

# ATOMI ERŐMIKROSKÓPIA

Szabó Bálint  
ELTE TTK, Biológiai Fizika Tanszék

## A MÉRÉS TEMATIKÁJA

Az atomi erőmikroszkóp (AFM) a nanotechnológia egyik legfontosabb vizsgálati és manipulációs eszköze. A mérés célja az AFM-mel való ismerkedés. A mérés során szabad levegőn és víz alatt mérnek a hallgatók a mikroszkóp kontakt és non-kontakt üzemmódját használva. Szilíciumból készült kalibráló rácsot és egy puha mintát vizsgálva cél a kétféle üzemmód összevetése, valamint a tú geometriai paramétereinek kiszámítása.

## IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A pásztázó szondás módszerek a XX. század végén alakultak ki. Az első ilyen technikát, a pásztázó alagútmikroszkópot (STM-et) Binnig és Rohrer találták fel 1981-ben. Az új mikroszkóp olyan áttörést hozott az atomi és nanométeres skálájú felületi struktúrák vizsgálatában, melyet 1986-ban Nobel-díjjal jutalmaztak. Ezt követően gyors ütemben jelentek meg további pásztázó szondás módszerek, köztük az atomi erőmikroszkóp (AFM, 1986). A pásztázó szondás módszerek közös tulajdonsága, hogy egy mikroszkopikus méretű szonda pásztázza a vizsgálandó felületet. Alapvetően a szonda és a felület közti kölcsönhatás tesz különbséget a különböző technikák közt. STM esetében elektromos áram folyik a szondán (hegyes fém vagy félvezető tűn) keresztül a mintába, vagy ellentétes irányban. Az AFM szondája egy szintén hegyes, de nem feltétlenül fém vagy félvezető tű. Ebben az esetben a tű és a minta közt fellépő erőt mérjük. Számos egyéb szonda ismert, így az ún. SNOM kihegyezett üvegszálas optikai szondája, a mágneses erőmikroszkóp (MFM) mágneses szondája, a spin polarizációs mikroszkóp pedig egy speciális STM, melyben a tű vékony mágneses réteggel van bevonva. Ezek mellett a legkülönbö-

zőbb szondákat, pl. hőmérő fejet lehet alkalmazni az adott felület vizsgálatára.

### **A PÁSZTÁZÓ SZONDÁS MÓDSZEREKRŐL (SPM) ÁLTALÁBAN**

Az STM fejlesztői valójában nem egyetlen új technikát, hanem a mikroszkópok egy családját találták fel, a pásztázó szondás mikroszkópokat.

Az optikai mikroszkópok elérhető legjobb felbontását korlátozza az ún. diffrakciós limit: a fény hullámhossza és az optika numerikus apertúrájának hányadosa megszabja a térbeli felbontást. Ez általában néhány 100 nm, amely speciális esetekben javítható, de az atomi felbontás nem megközelíthető. Ugyanakkor az elektronmikroszkóp (1931), melyben az elektronok hullámhossza a gyorsító feszültség emelésével csökkenthető, lehetővé teszi atomi felbontású felvételek rögzítését. Így a nagyfelbontású mikroszkópok versenyében a pásztázó szondás módszerek inkább az elektronmikroszkóppal sorolhatók egy kategóriába.

Az alapvető ötlet az, hogy a vizsgálandó felülethez atomi (vagy nanométeres) közelségbe kell vinni az ugyanekkora pontossággal pozícionálható mikroszkopikus szondát. Így a szonda és a felület közti kölcsönhatásban a szonda közvetlen közelségében levő atomok járuléka fog dominálni, feltéve, hogy a kölcsönhatás hatótávolsága kellően rövid. A szonda általában egy igen hegyes tű, melynek a hegyét ideális esetben egyetlen atom alkotja. A szonda mozgását a legtöbb esetben piezoelektromos kerámia végzi a tér mindhárom irányában. A szondáról érkező jel, amely a tű és a minta közti kölcsönhatásról informál, erősítőkön keresztül digitalizálás után számítógépbe vezetjük. A mikroszkóp képe közvetlenül nem látható, számítógépes feldolgozás után kerül megjelenítésre. Valószínűleg ez az egyik oka annak, hogy korábban nem alkalmazták.

A pásztázószondás módszerek felületek vizsgálatára alkalmasak, a minta belsejében lévő atomok, molekulák vizsgálatát nem teszik lehetővé. Konvenció szerint a felület síkját a koordinátarendszer xy síkjával, a minta normálisát pedig a koordinátarendszer pozitív z irányával azonosítjuk

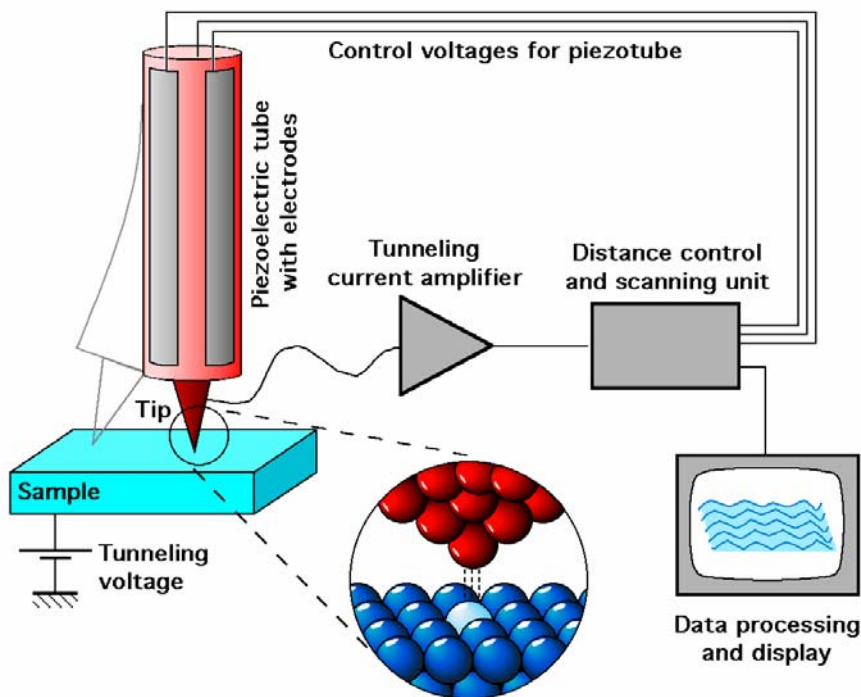
### **A PÁSZTÁZÓ ALAGÚTMIKROSKÓP (STM)**

A nanotechnológia minden bizonnyal az STM feltalálásával vált a természettudomány új ágává. Azzal, hogy az atomi skálán képes felületek

leképzésére, és ugyanilyen pontosságú beavatkozások elvégzésére, a modern szilárdtestfizika eszköztárának meghatározó eleme lett.

### AZ STM FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

Az 1. ábrán mutatjuk be az STM vázlatos mérési elrendezését. A fém vagy félvezető minta és a szonda, azaz a tű közé feszültséget kapcsolunk. A feszültség tipikus értéke 100 mV. Ennek hatására, ha a tű és a minta közti távolság elegendően kicsi, tipikusan néhányszor 0,1 nm, akkor a kvantummechanikából ismert alagútáram folyik. A detektált alagútáram nagysága exponenciálisan lecseng a tű-minta távolság növelésével. Az exponenciális függvény karakterisztikus távolsága tipikusan 0,1 nm. Ez az igen erős távolságfüggés teszi alkalmassá a módszert atomi felbontás elérésére, mivel az atomi távolságok is a 0,1 nm-es tartományba esnek. A tű atomi pontosságú pozicionálásához piezoelektromos mozgatót használnak. A piezoelektromos kerámiák feszültség hatására 0,01 nm-es pontossággal nyújthatók meg, ill. zsugoríthatók össze. A tipikusan 1 nA nagyságú alagútáramot az STM mérőfejébe épített előerősítővel erősítik fel. Az STM-et vezérlő elektronika összegyűjti a piezokerámiára kapcsolt feszültség és az alagútáram jelét. Ezeket digitalizálva a mérést vezérlő számítógép kiszámolja a tű aktuális pozícióját a 3D térben és az alagútáramot. Ha kellően sima a vizsgált felület, akkor a tű ütközés nélkül leképezi azt, és az alagútáramból következtethetünk a minta lokális magasságára. Ez az ún. állandó magasságú üzemmód, mert a tűt a minta síkjára merőleges z irányban nem mozgatjuk: a piezokerámia csak a minta síkjával párhuzamosan, az xy síkban pásztáz. A legtöbb esetben a minta nem annyira sima, hogy ezt az üzemmódot használhassuk. Ekkor a tűt aktívan kell emelni és süllyeszteni a minta topográfiáját követve. Ez az állandó alagútáramú vagy topografikus üzemmód. Ebben az esetben a vezérlőelektronika egy visszacsatoló áramkör segítségével folyamatosan emeli/süllyeszti a tűt, ha az alagútáram csökken/nő. Ideális visszacsatolás esetén a felület topográfiája tökéletesen lekövethető, és megjeleníthető.



1. ábra. Az STM sematikus felépítése és működési elve. Forrás: [http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_tunneling\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope)

Az STM szondája egy igen hegyes tű, amely elektromos áram vezetésére képes. A gyakorlatban a tű anyaga általában platina-irídium (Pt/Ir) ötvözet vagy wolfram. A Pt/Ir ötvözet kevésbé oxidálódik a levegőn. Az STM kezdeti időszakában a tű hegyezésének problémája számos technika bevetését kiváltotta. A feladat világos: olyan tűt kell létrehozni, amely hegyén egyetlen atom ül. Ez az első pillanatra rendkívül nehéz feladat a tapasztalatok szerint egyszerű makroszkopikus eszközök segítségével is megoldható. 0,1 mm átmérőjű Pt/Ir drótot ollóval elvágva (esetleg ezt követően csiszoló felületen csiszolva) a vágások jelentős százalékában nyerhető megfelelő STM tű. Ennek az az oka, hogy a Pt elszakadásakor mikrotüskék keletkeznek a drót végén, melyek közül csak a leghosszabb tüske fog részt venni a leképezésben. Ha a többi tüske is hasonlóan hosszú, akkor ezek is adnak járulékot az alagútáramban, ami az STM-es képen könnyen észrevehető.



2. ábra. Pt-Ir tű hegye transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) leképezve. A skálavonal hossza 20 nm. Forrás: <http://www.physics.purdue.edu/nanophys/uhvstm/tip.html>

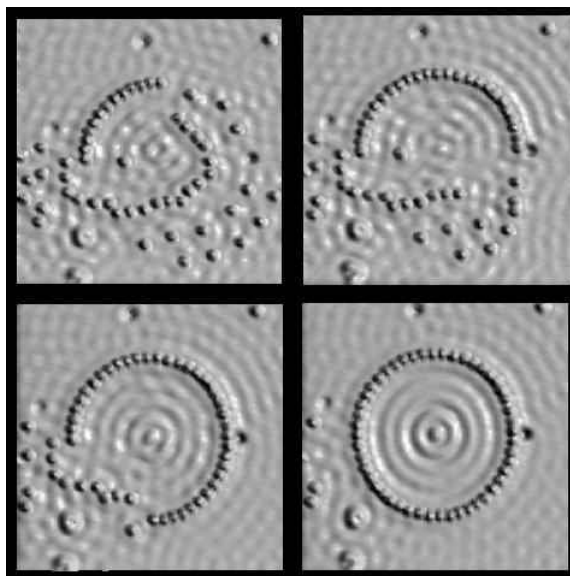
### AZ STM ALKALMAZÁSA: LEKÉPEZÉS, SPEKTROSKÓPIA ÉS MANIPULÁCIÓ

Az STM használható szabad levegőn, víz alatt és vákuumban egyaránt. A nagyfelbontású kísérletek általában alacsony hőmérsékleten vákuumban zajlanak. A kezdeti atomi felbontású képek rögzítéséről mára a bonyolultabb mérések felé tolódott el az alkalmazási terület.

A felületek megjelenítésén túl lehetőség van a lokális áram-feszültség görbe felvételére a tű adott pontban való rögzítésével. Ez az ún. spektroszkópiás üzemmód. Az áram-feszültség karakterisztika további információt hordoz a mintáról, melynek alapján eldönthető pl., hogy a vizsgált molekula fémes vagy félvezető tulajdonságú, ha félvezető, mekkora a tiltott sávja. Ez a tulajdonság különösen hasznosnak bizonyult, pl. a szén nanocsövek kutatásában.

Nem szabad elfelejteni, hogy a leképezés mellett atomi manipulációk elvégzését is lehetővé teszi az STM. A tű és a minta közé kapcsolt fe-

szültség impulzus segítségével a felületen lévő gyengén kötött atomok felszedhetők, a felület más pontján lerakhatók (3. ábra).



3. ábra. Vas atomok a réz (111) kristálytani felületén. Az ábra látványos betekintést nyújt egyedi atomok STM tűvel történő rendezésébe és a kialakuló felületi struktúra kvantumviselkedésébe. Forrás: M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler: *Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. Science* 262, 218-220 (1993).

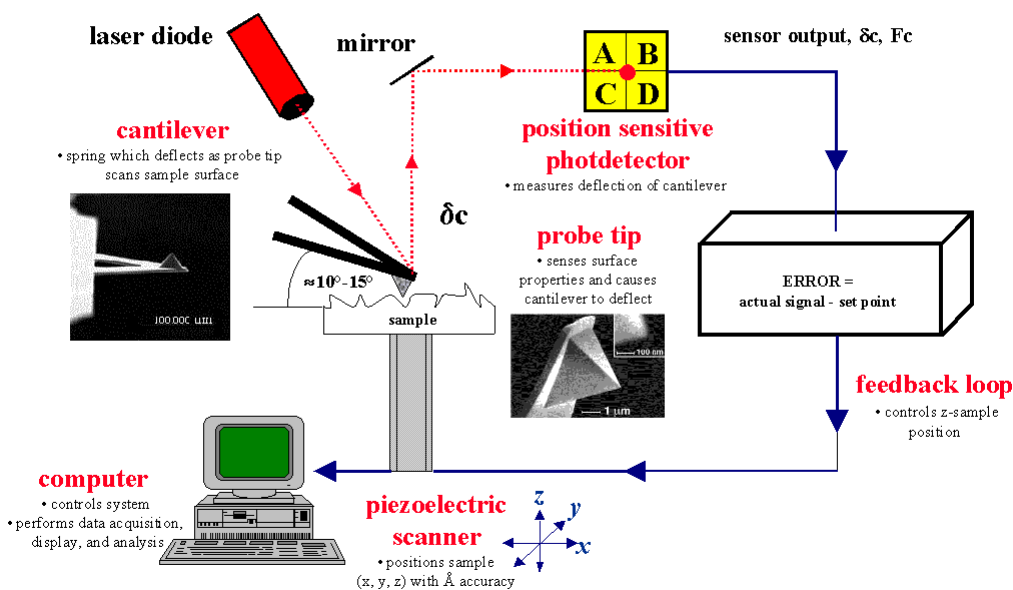
Ugyanakkor az STM egyik legnagyobb hátránya, hogy kizárólag fém- vagy félvezető felületek vizsgálatában használható. Elvben ugyan lehetséges elektromosan szigetelő molekulák vizsgálata is a fém felületre helyezve. Ilyen irányú kísérletek nem jártak jelentős sikerrel biológiai makromolekulák, pl. DNS vizsgálatokkor. Valószínűleg ez volt a fő motiváció, amely az atomi erőmikroszkóp kifejlesztéséhez vezetett.

Az atomi erőmikroszkóp (AFM vagy pásztázó erőmikroszkóp (SFM))

Az STM alkalmazási területének szűkösége --minden bizonnyal-- közrejátszott abban, hogy néhány éven belül, 1986-ban Binnig, Quate és Gerber feltalálta az AFM-et. Az új módszer megnyitotta az utat a nanotechnológia biológiai alkalmazásai előtt.

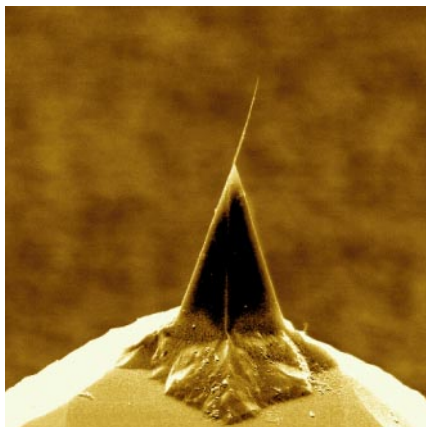
AZ AFM FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

*Atomic Force Microscopy (AFM) :*  
General Components and Their Functions

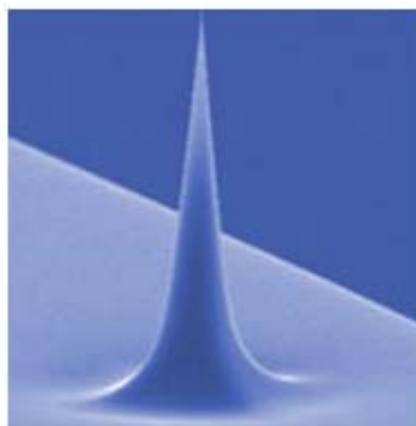


4. ábra. Az AFM sematikus felépítése és működési elve. Forrás: <http://web.mit.edu/cortiz/www>

Az AFM szondája egy igen hegyes tű, amely azonban nem kell, hogy elektromosan vezető legyen. Leggyakrabban szilícium (Si) vagy szilícium nitrid (SiN) a tű anyaga. Az alkalmazástól függően azonban egy sor egyéb anyagból is készítenek tűket, érdekes példa az egyetlen szén nanocsőből készített tű (5. ábra). Általában a tű hegyének göbületű sugara a 10-100 nm-es tartományba esik. A tű másik, nagyobb skálájú paramétere a tű nyílásszöge. Speciális esetekben készítenek kis nyílásszögű tűket (6. ábra).



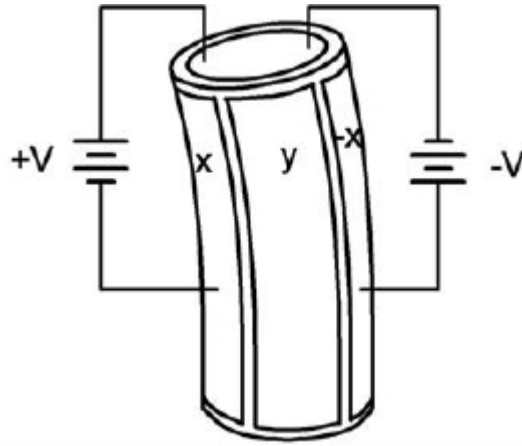
5. ábra. Pásztázó elektronmikroszkópos kép egy egyfalú szénnanocsőről, melyet AFM tűjére rögzítettek. Forrás: <http://www.nccr-nano.org/nccr/>



6. ábra. Speciális kúp tű. Hossza: 7-11  $\mu\text{m}$ , nyílásszöge  $10^\circ$ . Forrás: [www.veecoprobes.com](http://www.veecoprobes.com)

A tű egy rugólapkához van rögzítve. A rugólapka meghajlásából következtethetünk a tű és a minta közti erőre. A rugólapka és a tű előállítás általában egyszerre történik SiN-ből litográfiai technológiával. A tűt a rugólapkával együtt mozgatja a piezoelektromos (piezo) szkennerek. Bizonyos AFM-ekben nem a tűt, hanem a mintát mozgatják, amely azonban a mérés szempontjából nem jelent érdemi különbséget. A piezo szkennereknek számos változatuk ismert. Ideális esetben a tér mindhárom irányban atomi pontossággal képesek a tűt mozgatni megfelelő feszültség hatására. A csőszkennerek (tube scanner) ezt ötletes geometriával oldják meg (7. ábra). Az ún. tripod, azaz háromláb szkennerekben 3 egymásra merőlegesen elhelyezett piezokerámia biztosítja a 3 irányú mozgatást.





7. ábra. Piezoelektromos csőszkenner vázlatos rajza. A cső palástját alkotó 4 szegmensű piezokerámia szemközti szegmenseire ellentétes irányú feszültséget kapcsolva a szkennert elhajlik. A cső tengelyére merőleges irányú pásztázás ezen az elven alapul. A tű süllyesztése és emelése mind a négy szegmensre azonos irányú feszültség kapcsolásával történik.

A rugólapkában ébredő erő mérése az AFM egyik központi eleme. Az STM esetén az atomi felbontást az alagútáram erős, exponenciális távolságfüggése teszi lehetővé. Az AFM érzékenységét a rugólapka meghajlásának 0.01 nm pontosságú detektálása biztosítja. Ez optikai úton, egy lézernyaláb alkalmazásával történik. Az AFM mérőfejébe épített lézertióda fényt a rugólapka hátsó (azaz a túvel ellentétes) oldalára fókuszálja. A rugólapka által visszavert fényt egy négysegmensű (A,B,C,D) pozícióérzékeny fotodióda érzékeli. A rugólapka atomnyi elhajlását tehát a lézer hosszú (több cm-es) fénypálya nagyítja fel a makroszkopikus skálára (4. ábra). A fotodióda szegmensein mért áramból kiszámolható, hogy a lézertöltés pontosan hova vetődik a detektor felületén. Ha minden szegmensre egyforma (nem 0) fényintenzitás kerül, akkor a lézertöltés a detektor közepére esik. Ettől eltérő esetekben a szegmensek áramának különbségéből határozzák meg a lézertöltés helyzetét. Fontos tudni, hogy a módszer nem egyértelmű, mivel az is előfordulhat, hogy a lézertöltés a detektor szélére vetül. A mérés során a fotodióda felső és alsó (illetve bal és jobb) két-két szegmensén mért áram különbsége jeleníthető meg. Az angol rövidítések nyomán a felső két szegmens összegzett áramát T-vel, az alsókét B-vel, a bal két szegmensét L-lel, a jobb szegmensekét pedig R-rel jelöljük:

$$T-B=(A+B)-(C+D)$$

$$L-R=(A+C)-(B+D)$$

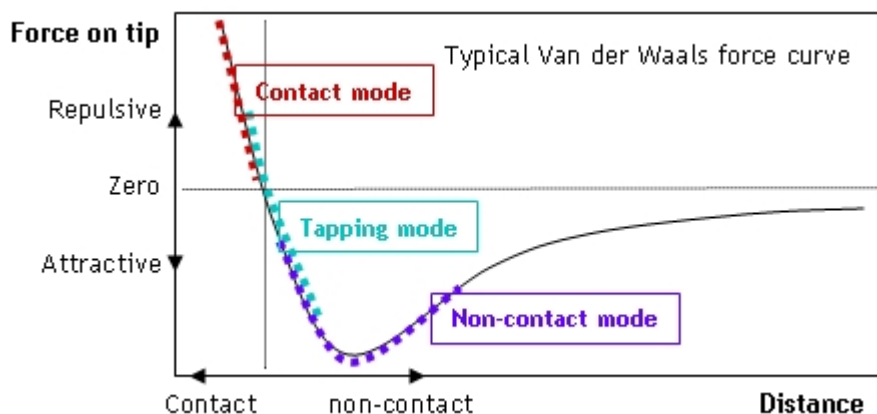
A T-B érték a rugólapka meghajlásával, azaz a felületre merőleges irányú erővel, míg az L-R a rugólapka csavarodásával, azaz a felülettel párhuzamos súrlódási erővel arányos.

A fotodiódák jele erősítőn keresztül digitalizálásra, majd számítógépre kerül a piezoszkennerek jelével egyetemben.

Ahhoz, hogy a minta felületét pontosan tudja követni a tű, visszacsatoló áramkörre van szükség. Visszacsatolás nélkül, vagy gyenge visszacsatolással a tű lényegében azonos magasságban pásztáz, a z-irányú piezokerámia nem mozog. Így a felületről ún. „deflection mode”, vagyis meghajlási képet rögzítünk. A rugólapka ugyanis meghajlik, ha a felület magasabb pontja fölé kerül a tű, és lehajlik, ha a tű alacsonyabb terület fölé ér. A meghajlási üzemmód csakis nagyon sima felületeken alkalmazható, egyébként a tű a minta kiemelkedéseinek ütközik, ami károsíthatja a tűt és a mintát is, a leképezés minőségét pedig rontja.

### **A TŰ ÉS A MINTA KÖZTI KÖLCSÖNHATÁS**

A minta és a tű anyagától függően sokféle kölcsönhatás felléphet a tű és a minta között. Alapesetben az AFM tűje és a minta között Van der Waals típusú erő hat (8. ábra). Ez azt jelenti, hogy távol a mintától az erő enyhén vonzó és a 0-hoz tart. A mintához közeledve egyre nő a vonzó erő nagysága, míg elér egy maximumot néhány atomnyi távolságra a mintától (Van der Waals távolság). Ha ennél is közelebb kerül a tű hegye a mintához, akkor taszító erő lép föl, amely meredeken nő, ahogy a tű-minta távolság csökken.



8. ábra. Az AFM tűje és a minta felülete közt ható erő sematikus ábrázolása a tű-minta távolság ( $h$ ) függvényében. Kontakt üzemmódban van a mintához legközelebb a tű hegye, ekkor erős taszítás jellemzi a tű-minta kölcsönhatást. Non-kontakt üzemmódban a tű hegye az erősen taszító tartományon kívül marad. Az ún. „tapping” vagy kopogtató üzemmódban a kontakt és a non-kontakt tartomány közt mozog a tű hegye. Forrás: <http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology/AFM>

## A KONTAKT MÉRÉSI ÜZEMMÓD

Legelterjedtebb a kontakt, állandó erejű üzemmód. Ilyenkor a tű és a minta közti jelentős nagyságú (tipikusan néhány nN-os) taszító erőt állandó értéken tartjuk azzal, hogy a rugólapkát fel-le mozgatjuk attól függően, hogy a mért erő csökken vagy nő a felület pásztázása közben. Ez úgy oldható meg, hogy a T-B szenzoráramot folyamatosan mérve, a z irányban mozgó piezokerámiára visszacsatoló áramkörön keresztül akkora feszültséget vezetünk, ami kompenzálja a rugólapka meghajlását.

A visszacsatolásnak 3 paramétere van. Ha a beállított értéktől eltér az aktuális T-B jel értéke, azaz a hibajel nem 0, akkor az eltéréssel arányosan vezéreljük a z piezokerámia feszültségét, ez az ún. „proportional” visszacsatolás, amely az aktuális hibajel minimalizálja. Ha a beállított érték és a mért érték eltéréseinek (azaz a hibajel) időbeli integrálja vagy differenciálja nem 0, akkor ezeket is figyelembe tudjuk venni a visszacsatolás stabilitásának növeléséhez. Az integrált figyelembe véve „memóriát” adunk a visszacsatolásnak, „emlékszik” a rendszer a múltjára. Ezzel

elkerülhető a rendszer gerjedése: a hibajel integráljának minimalizálása kisimítja a jelet. A differenciált ritkábban szokták figyelembe venni, ez segíthet a visszacsatolás időállandójának csökkentésében, azaz gyorsabbá tehető vele a rendszer. Az ún. PID (proportional-integral-derivative) szabályzás elterjedt számos egyéb területen.

Ideális esetben a tű állandó nagyságú erő mellett pásztázza a felületet, tehát a rugólapka meghajlása, és ezzel a T-B jel állandó, miközben a z piezokerámia úgy mozgatja a tűt, hogy az az állandó erejű felületen mozog: letapogatja a felszín. Első közelítésben az állandó erő melletti letapogatás megadja a felület 3D topográfiáját. Ez akkor teljesül, ha a tű-minta erő csak a tű-minta távolságtól függ. A gyakorlatban ez bizonyos esetekben félrevezető lehet, ugyanakkor legtöbbször jól közelíti a topográfiát az állandó erő mellett mért felület.

### **NON-KONTAKT ÉS TAPPING ÜZEMMÓD**

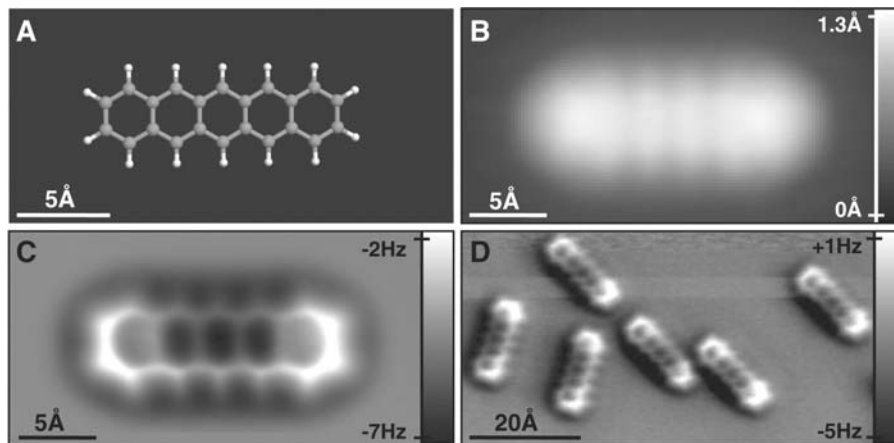
A kontakt leképezés hátránya, hogy a tű-minta taszító erő mellett a súrlódás is jelentős, így a minta károsodhat. Ezen túl a puha mintába benyomódik a tű, ami a kép felbontását és kontrasztját rontja. Ezért elsősorban biológiai alkalmazásokra kifejlesztették a non-kontakt és a tapping üzemmódokat, melyek egymáshoz hasonló elven működnek, de a tű-minta erő különböző (bár átfedő) tartományában. A non-kontakt üzemmódban elérhető felbontást a 8. ábra szemlélteti.

A tűt és a rugólapkát a z irányban mozgó piezokerámia nagyfrekvenciás (kHz-100 kHz) rezgésre kényszeríti a rugólapka rezonanciafrekvenciájához közel. A rezgés amplitúdója tipikusan néhány nm. A kényszerrezgés két alapvető paramétere az amplitúdó és a fáziskésés. Non-kontakt és tapping üzemmódban állandó amplitúdójú vagy fázistolású kényszerrezgés mellett képezzük le a felületet. Ilyenkor nem a tű és a minta közti erő, hanem az erő z irányú gradiense állandó. A tű és a minta közti kölcsönhatás megváltoztatja a rezgés amplitúdóját.

A hibajel a rezgés amplitúdójának (vagy fáziskésésének) eltérése az előre beállított értéktől. Ebben az esetben is PID szabályzást alkalmazunk a kontakt üzemmóddhoz hasonlóan, a kimenet továbbra is a z piezokerámia feszültsége.

Non-kontakt üzemmódban keményebb rugólapkát szoktak használni. Kontakt mérésnél a mérés érzékenységét megszabja a rugóállandó, ezért

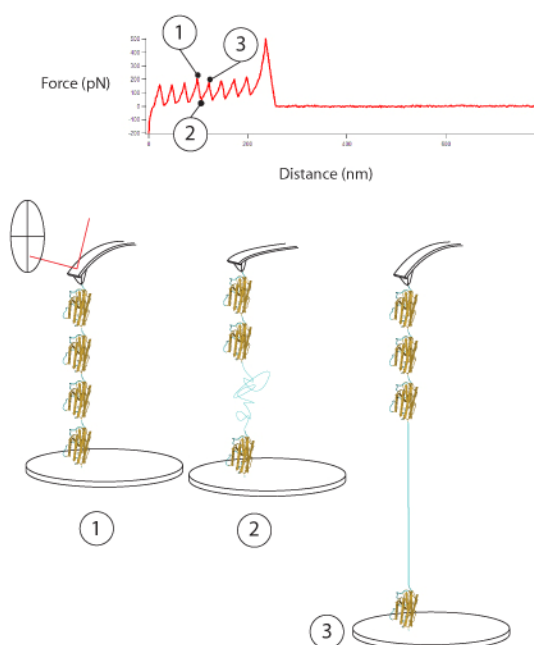
puha rugólapkát használnak, non-kontakt üzemmódban fontos a rezgés jósági tényezője (quality factor), amelynek a keményebb rugó kedvez.



9. ábra. A pentacene molekula kémiai szerkezetét bemutató STM és AFM képek. A: a pentacene molekula golyó-pálcika modellje. B: állandó áramú STM felvétel. C-D: Állandó magasságú, non-kontakt AFM felvétel. A felületen lévő molekula atomi felbontását a CO molekulacsoporttal módosított tű és a tű-minta közt fennálló Pauli-ely teszi lehetővé. Forrás: Science 325, 1110 – 14 (2009)

## ERŐ SPEKTROSZKÓPIA

Pásztázás nélkül a tűt a minta egy jól meghatározott pontja fölött felle mozgatva a tű-minta kölcsönhatás távolságfüggéséről kaphatunk információt, kimérhető a 8. ábrán bemutatott függvény. A molekuláris szintű kölcsönhatások vizsgálatakor fontos eszköz az AFM spektroszkópiai üzemmódja. Akár egyetlen kémiai kötés, vagy akár pN-os erejű kölcsönhatás is feltérképezhető, ha a kölcsönhatásban résztvevő egyik molekulát a felületre, a másikat pedig a tű hegyére rögzítjük. Makromolekulák belső struktúrája is vizsgálható, ha a molekula egyik végét a tűhöz, másikat a hordozóhoz rögzítjük (10. ábra).



10. ábra. A doménekből álló makromolekulák kitekeredését idézhetjük elő az AFM tűjével. Közben regisztrálhatók az egyes domének letekeredésekor megjelenő fűrészfogak az erő-távolság grafikonon. Forrás: <http://www.chbmeng.ohio-state.edu/~sarkara/research/Research/Methods/methods.html>

## A MÉRÉS RÖVID LEÍRÁSA

### *Kalibrációs rács vizsgálata a Topometrix Explorer AFM-mel*

A műszer használatát a laborvezető mutatja be.

Kontakt üzemmódban készítene felvételeket a hallgatók 4 szegmensű szilícium kalibrációs rácsról. A kalibrációs rács rácsállandója eltérő a négy szegmensen. A leképezés paramétereinek hangolásával minél jobb minőségű meghajlási és topográfiai képek rögzítése a cél. A mérés szabad levegőn, ill. víz alatt történik.

Változtatható paraméterek:

pásztázási sebesség

pásztázott terület nagysága

mérőfej dőlésszöge

a tű és a minta közti erő nagysága (kalibráció nélkül)

A minta finom részleteit a meghajlási képen érdemes tanulmányozni, míg méréseket a topográfiai képen lehet végezni. Ennek alapján ki kell számolni a rácsállandókat, valamint a rács mélységét. Meg kell becsülni a tű hegyének görbületi sugarát és a tű nyílásszögét.

A mérés elején az AFM mérőfejébe helyezzük és rögzítjük az ún. „tripod” szkennert. A szkennert vezetőkezeit bekötjük, ezt követően bekapcsoljuk a vezérlőegységeket, a tőről és a mintáról képet adó monitort, valamint a mérésvezérlő számítógépet. Elindítjuk a vezérlő szoftvert, kiválasztjuk a szkennerekhez tartozó megfelelő kalibrációs fájlt.

A szkennerekre helyezzük a rugólapkát és a tűt (MSCT-AUHW Thermomicroscopes) hordozó félkör alakú lemezt, melyet a szkennert mágnesei tartanak a mérés során. Élesre állítjuk a monitor képét a 100x-os nagyítású kamera fókuszálásával. Bekapcsoljuk a lézert. Ezt követően a lézerfoltot a kívánt rugólapka végére pozicionáljuk a mérőfej oldalán lévő beállító csavarok segítségével. Maximalizáljuk a detektor szegmensekre eső összes fény intenzitását a visszavert lézernyalábot terelő tükör segítségével. A detektor szegmensek jele a számítógép monitorán megjeleníthető. A T-B jelet -20 nA körüli értékre érdemes állítani a megfelelő visszacsatolás elérése érdekében. A „setpoint”, vagyis a tű lerakása utáni kívánt T-B érték 5 nA legyen! A PID visszacsatolás P értékét 1 körülire, az I-t 0,1 körülire állítjuk. (Túl nagy értékek gerjedéshez vezetnek.)

Ezt követően a mérőfejet a minta fölé helyezzük. A fej hátulján lévő két csavar manuális állításával, valamint a fej első felén lévő motoros láb vezérlésével a tűt a minta közelébe eresztjük. A tű-minta távolság a moni-

tor képe alapján megbecsülhető. Végül szoftverrel tesszük le a tüt a felületre. Kalibrációs görbék felvételével meggyőződünk róla, hogy megfelelő a tü-minta kölcsönhatás, stabil a visszacsatolás. Beállítjuk a letapogató terület méretét  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ -re, a pásztázási frekvenciát 4 Hz-re. Előre és hátra pásztázásnál is veszünk fel topográfiai és elhajlási képeket. Összesen 4 képet rögzítünk minden pásztázásnál. Az első kép rögzítése után beállítjuk a mérőfej dőlését, hogy a minta síkjával minél inkább párhuzamos legyen a pásztázás síkja.

A továbbiakban a pásztázási paraméterek (T-B „setpoint”, vagyis a tü-minta közt ható taszító erő nagysága, sebesség, PID értékek, pásztázott terület nagysága) változtatásával optimalizáljuk a képek minőségét.

#### *Puha anyag vizsgálata a Topometrix Explorer AFM-mel*

Puha mintán végeznek mérést a hallgatók az AFM kontakt és non-kontakt üzemmódját összevetve. A kontakt mérés a fentiek szerint történik. Non-kontakt üzemmódra való áttéréskor a tüt és a rugólapkát lecseréljük a puháról egy speciálisan a non-kontakt mérésekhez gyártott (Veeco TESP-MT típusú) lapkára. A z piezokerámiára kapcsolt feszültség frekvenciájának hangolásával megkeressük a rugólapka rezonancia frekvenciáit. (Gyári érték: 230-410 kHz). A rezonanciafrekvenciához közeli érték mellett a szoftverben áttérünk a non-kontakt üzemmódra. A mérés ezek után hasonló a kontakt üzemmódhoz.