

ÉRZÉKELŐK

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

23. ÉRZÉKELŐK ÉS NANOTECHNOLÓGIA: "ATOMI" FELOLDÁSÚ ÉRZÉKELÉS ESZKÖZEI, STM ÉS AFM



2013/2014/1. félév

1

23. ELŐADÁS: A NANOTECHNOLÓGIA ESZKÖZEI, STM ÉS AFM

1. Pásztázószondás mikroszkóp
2. Pásztázó alagútmikroszkóp, STM
3. Atomerő mikroszkóp, AFM

(H. Heinzelmann: Processing techniques and tools for nanofabrication (EuroTraining Course Nanotechnology for Electronics, Budapest 2010. június 14-15) előadása anyagainak felhasználásával)

Részletesebben:

Mojzes Imre és Molnár László Milán: Nanotechnológia, 5. fejezet.

2

MÉRÉS ÉS MANIPULÁCIÓ A NANOVILÁGBN

A nanométeres mérettartományban nem elegendő már a hagyományos optikai mikroszkópok maximális felbontóképessége sem, ezért új, a fénymikroszkóptól alapelveiben is különböző eszközökre van szükség a nanostruktúrák megfigyelésére.

A nanotudomány és nanotechnológia szempontjából döntő lépésnek bizonyult az ún. pásztázószondás mikroszkópok (*Scanning Probe Microscope, SPM*) különböző válfajai elvének felismerése és a megfelelő készülékek kifejlesztése, melyek nem "átvilágításon" vagy reflexión alapulnak, hanem új elven, azaz a az alkalmazott szondának és a minta felületével illetve a minta felületén lévő atomokkal való kölcsönhatásán alapulnak. Az úttörő itt az 1981-ben magalkotott pásztázó alagútmikroszkóp (*Scanning Tunneling Microscope, STM*) volt,

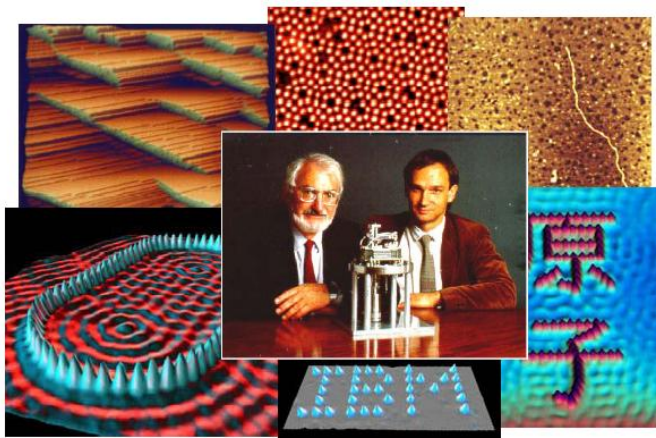
3

PÁSZTÁZÓSZONDÁS MIKROSKÓPIA

Az 1980-as és 1990-es években a nanokémia és nanofizika megkezdhetette az egyedi nanorészecskék és egyedi molekulák világának birtokba vételét, mivel újfajta mikroszkópok és eljárások egész sora jelent meg. A pásztázó alagútmikroszkópok (*Scanning Tunneling Microscope -STM*) és az atomerő mikroszkópok (*Atomic Force Microscope -AFM*) már nem csak bepillantást engednek ebbe a világba, hanem kialakulóban vannak eljárások az anyag nanométeres finomságú megmunkálására is. Évről évre új mérési eljárások és műszerek, valamint új megmunkálógépek születnek, új nanotechnológiai laboratóriumok épülnek.

4

PÁSZTÁZÓ SZONDÁS MIKROSZKÓPOK



SPMs mark the beginning of nanotechnology

STM (*Scanning Tunneling Microscope*)

1981: Gerd Binnig, Heinrich Rohrer (IBM, Zürich), Nobel: 1986

(Ernst Ruska-val megosztva, aki a SEM feltalálója)

AFM (*Atomic Force Microscope*) 1986: Binnig, Rohrer, Quate

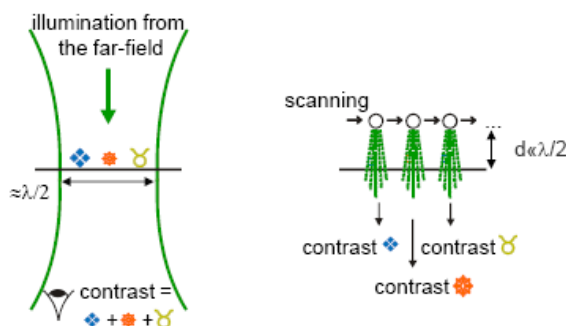
5

PÁSZTÁZÓSZONDÁS MIKROSZKÓP ELVE

Scanning Probe Microscopy, SPM

NEM távolférfi effektus, gerjesztés, illetve megfigyelés a közelterben (lokális érzékelés).

Feloldás nem függ a hullámhossztól, hanem a szonda méretétől, a felülettől való távolságtól.



6

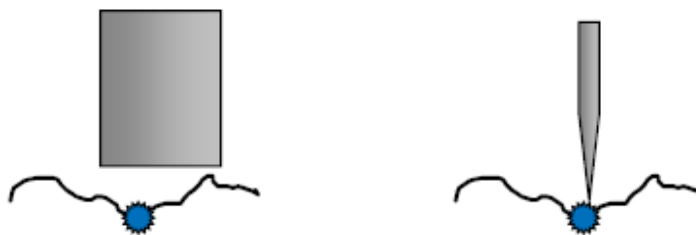
PÁSZTÁZÓSZONDÁS MIKROSKÓP (SPM)

Pásztázószondás mikroszkóp (*Scanning Probe Microscope*, SPM):

Feloldóképesség:

A szonda geometriai mérete \Rightarrow a szonda legyen kicsi

A szonda-minta felület távolsága \Rightarrow szonda legyen hegyes (pontszerű)

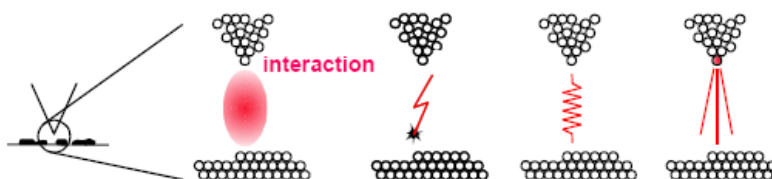


A pásztázószondás mikroszkóp a felületet érzékeli.

7

PÁSZTÁZÓSZONDÁS MIKROSKÓPIA: KÖLCSÖNHATÁSI MECHANIZMUSOK

Különböző kölcsönhatások, különböző SPM típusok:



A kölcsönhatás jellege határozza meg, hogy a minta milyen tulajdonságát érzékeli.

A kölcsönhatás erőssége meghatározza, hogy a mintát **megfigyeljük**, vagy **módosítjuk**.

Az SPM mikroszkóp és szerszám/eszköz is egyben!

8

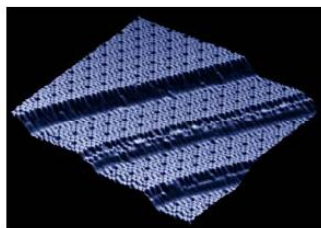
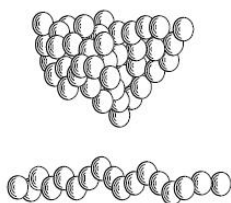
PÁSZTÁZÓSZONDÁS MÓDSZEREK

Név	Működési elv	Előnyök	Hátrányok
Pásztázó alagútmikroszkóp STM (<i>Scanning Tunneling Microscope</i>)	Minta és SPM hegy közötti alagútáram mérése	- Nem igényel mintaelőkészítést - Nincs szükség különleges atmoszférára	- Csak vezető (esetleg félvezető) minta vizsgálható
Atomerő-mikroszkóp AFM (<i>Atomic Force Microscope</i>)	Minta és AFM hegy közötti erőhatás mérése	- Sokrétű felhasználás - Nem igényel mintaelőkészítést - Nincs szükség különleges atmoszférára	- Atomi felbontás csak speciális körülmények között érhető el - Rezgésre fokozottan érzékeny
Közeltéri optikai Mikroszkóp (<i>Scanning Near-Field Optical Microscope</i> , SNOM)	Rendkívül kis apertúrájú fényforrást használó transzmissziós, vagy reflexiós optikai	- Spektroszkópiai alkalmazás - Diffrakciós limit nem korlátozza a felbontást	9

PÁSZTÁZÓ ALAGÚTMIKROSKÓP (STM)

Scanning Tunneling Microscope STM

Kölcsönhatás: alagútáram (pA - nA)
Felület elektromos tulajdonságai

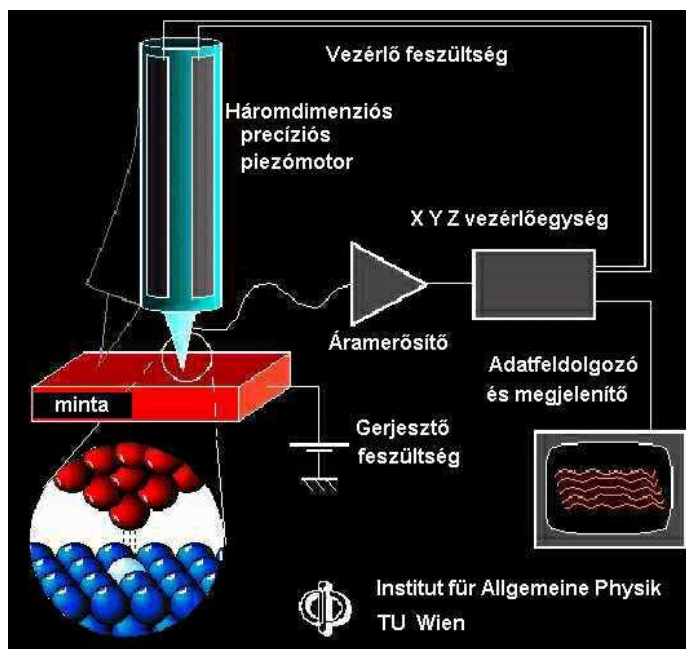


Alagútáram mérésén alapul, a minta felületéhez igen közelvitt hegyes fémtű és minta felülete között.

PÁSZTÁZÓ ALAGÚTMIKROSKÓP STM

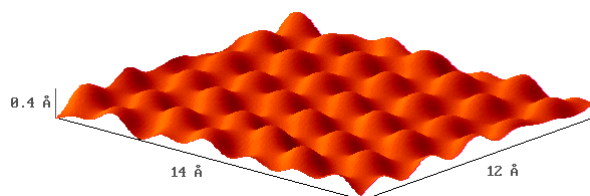
A pásztázó alagútmikroszkóp (*Scanning Tunneling Microscope, STM*) elektromosan vezető felületek atomi léptékű vizsgálatára és módosítására alkalmas eszköz. Az alagútmikroszkópban egy igen hegyes tűt mozgatunk a felülettől nanométeres távolságra, miközben a tű és a minta közé néhány volt nagyságrendű feszültséget kapcsolunk. Az STM leggyakrabban alkalmazott üzemmódjában (állandó áramú leképezés) miközben a minta síkjában a tűvel pásztázó mozgást végzünk, egy visszacsatoló hurokkal a tű felület fölötti magasságát úgy szabályozzuk, hogy a tű és a minta közötti, általában nanoamper nagyságrendű alagútáram állandó értéken maradjon. A tű így kialakuló háromdimenziós mozgása adja az STM képet. A megfelelő módon zajvédett (elektromos és mechanikai zajok szempontjából egyaránt) STM elegendően sima felületeken - pl. hasított egykristály - rutinszerűen képes elérni az atomi felbontást.

11



12

ATOMI FELBONTÁSÚ STM KÉP



Atomi felbontású STM kép HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) felületéről

13

KVANTUMMECHANIKAI ALAGÚTHATÁS

Kvalitatív leírás:

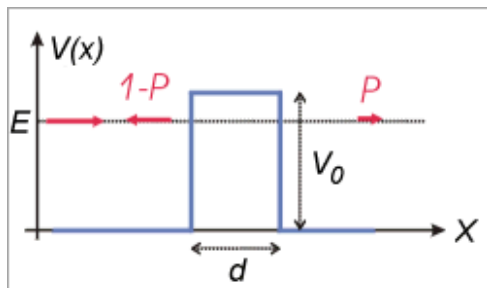
Két elektromosan vezető test (két elektróda) között akkor is folyik áram (ráadott feszültség esetén), ha nem érintkeznek, elég közel vannak egymáshoz: kvantummechanikai alagúteffektus.



Az alagútáram rendkívül erősen függ a távolságtól! A releváns méretskála a folyamatban résztvevő részecskék (elektronok) kvantummechanikai hullámhossza.

14

ALAGÚTHATÁS: FIZIKA



$$P = \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-2\kappa d},$$

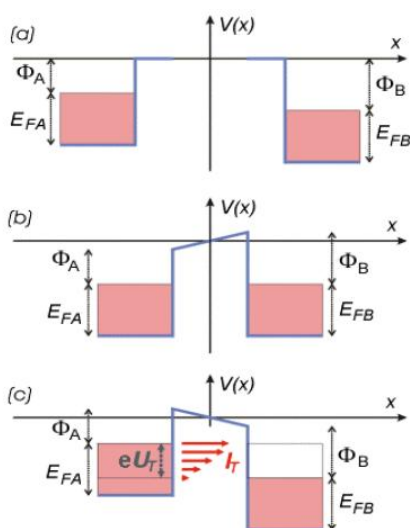
$$\kappa = \sqrt{2m/\hbar^2 (V_0 - E)}.$$

V_0 magasságú és d szélességű potenciálgát. Az E energiával érkező részecske P valószínűséggel hatol át a potenciálgáton és $(1-P)$ valószínűséggel verődik vissza.

P képlete aszimptotikusan igaz a $\kappa d \gg 1$ határesetben.

15

ALAGÚTÁRAM



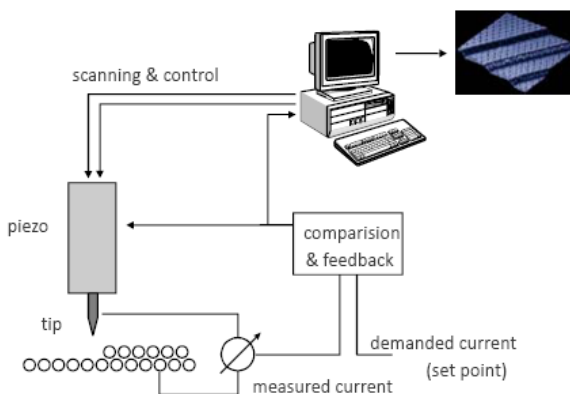
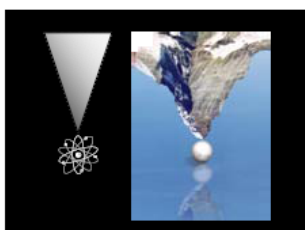
Két fém összeillesztésénél a Fermi-szintek közös értékre állnak be.

Külső elektromos potenciál eltolódást idéz elő kialakul a potenciálgát, melyen keresztül alagútáram folyhat.

16

STM FŐBB EGYSÉGEI

Elmozdulások nm és nm
alatti skálán: piezo-
elektromos aktuátorok
Visszacsatoló kör: állandó
szonda-minta távolság
Elektronikus vezérlés
Adatgyűjtés
Szonda/tű
Rezgéscsillapítás



STM: A SZONDA HEGYE

Az STM hegy természetesen vezető kell, hogy legyen, ezen kívül pedig követelmény az anyagával szemben, hogy ellenálló legyen.

Volfrám, platina-iridium ötvözet.

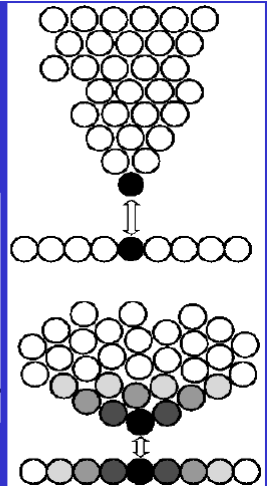
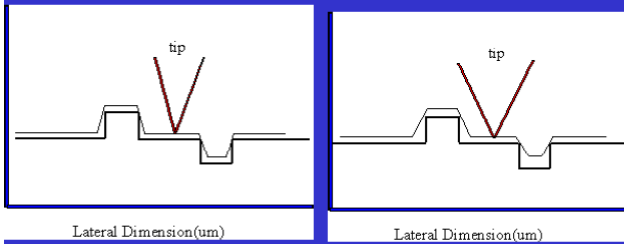
A „hegyezés” legkifinomultabb az elektrokémiai maratás: a volfrám esetében kálium-hidroxid (KOH), a platina-iridium ötvözet esetében kálium-klorid vizes oldata.

Az STM képképzését alig befolyásolják a mikroszkóp hegyének geometriai viszonyai.

A legegyszerűbb STM alkalmazásokban gyakran elég egy finom vágóeszközzel kis szögben elválni egy volfrám huzalt. Az ilyen módszerrel elkészített STM hegyek geometriája véletlenszerűen alakul ki, a csúcs görbületi sugara μm és $1 \mu\text{m}$ közé esik.

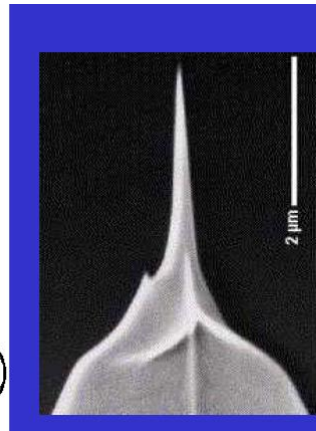
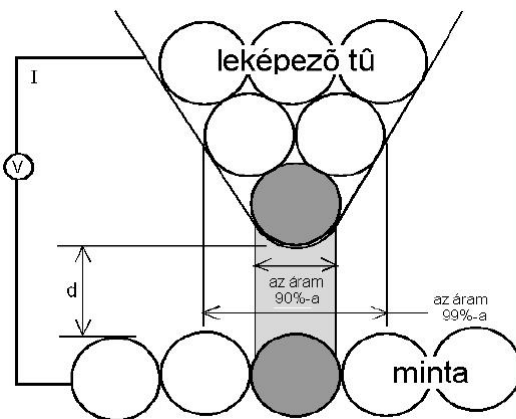
STM: A TÚ

Az alagútáram exp. távolságfüggése miatt fontos a tű geometriája. Ideális esetben egyatomos hegy van.



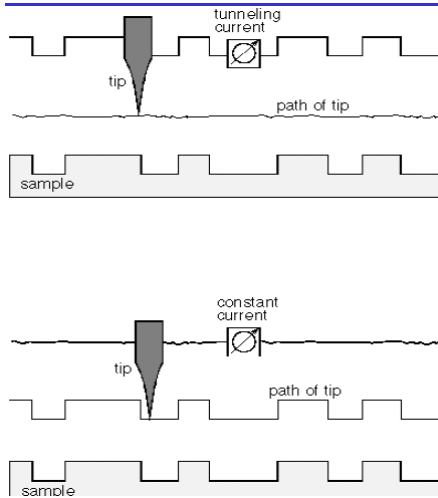
19

STM: A TÚ



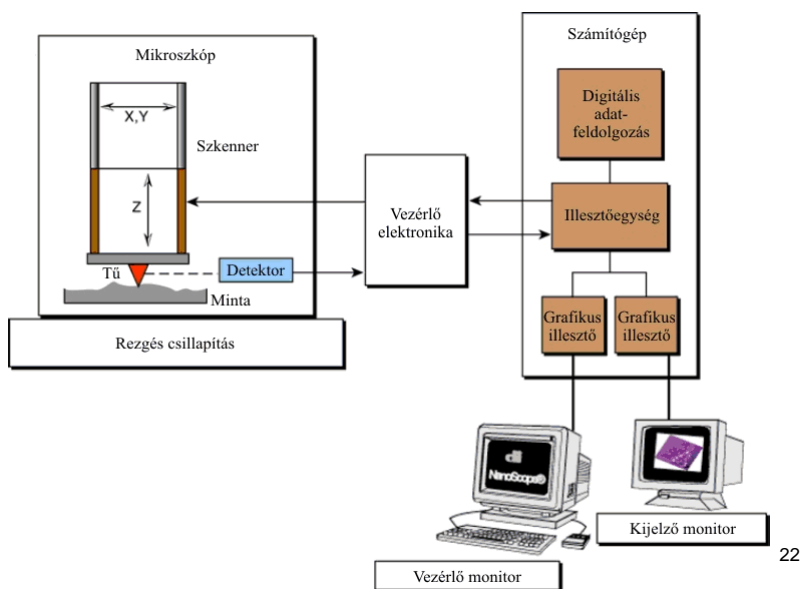
20

STM MÉRÉSI ÜZEMMÓDOK



állandó áramú (lent), illetve állandó csúcstávolságú üzemmód (fent)

STM "GYAKORLAT"



22

STM "GYAKORLAT"



Veeco NanoscopeE STM/AFM (MTA MFA)

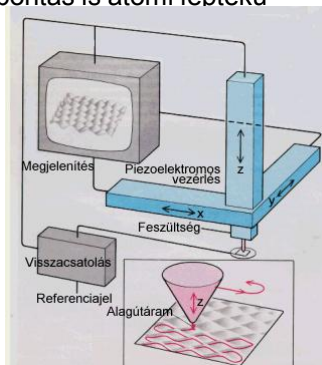
23

STM "GYAKORLAT"

Az STM, mint eszköz működése.

Az egyik elektródát igen hegyes tű. Ekkor az alagútáram csak a tű hegye körüli keskeny csatornában fog folyni, mivel az alagutazási valószínűség exponenciális távolságfüggése miatt a tű távolabbi részei és a minta közötti áram elhanyagolhatóan kicsi. Ennek az alagút csatornának a szélessége körülbelül akkora, mint a tű csúcsának a görbületi sugara. A műszer felbontását elsősorban az alkalmazott tű hegyessége határozza meg. Ha atomi skálán hegyes tűt alkalmazunk, akkor a felbontás is atomi léptékű lesz.

A tűt egy olyan háromdimenziós mechanikai mozgató rendszerre szerelik, amely igen finom (század nanométeres, vagy finomabb) pontossággal képes mozgatni a tűt a minta felett. A gyakorlatban erre a célra általában piezoelektromos mozgatókat alkalmaznak.



STM "GYAKORLAT"

A tű és a minta közé Volt nagyságrendű előfeszítést kapcsolnak. Ezután a tűt óvatosan addig közelítik a felülethez, amíg megjelenik az alagútáram és elér egy előre beállított $I_{\text{referencia}}$ értéket. Minél nagyobb az $I_{\text{Referencia}}$, annál közelebb kerül a tű a felülethez, gyakorlatban a tipikus nagysága nA körüli.

A minta X-Y síkjában a tűvel pásztázó mozgást végeznek, hasonlóan a TV készülékekben alkalmazott vezérléshez. Természetesen, mivel itt nem elektronsugarat, hanem makroszkopikus tömegeket mozgatnak, a mechanikai rendszer tehetetlensége és rezonanciái miatt az alkalmazható kép- illetve sorfrekvencia kisebb, mint a TV esetén megszokott. Ezért egy STM kép fölvétele általában másodpercekig, vagy percekig tart.

25

STM "GYAKORLAT"

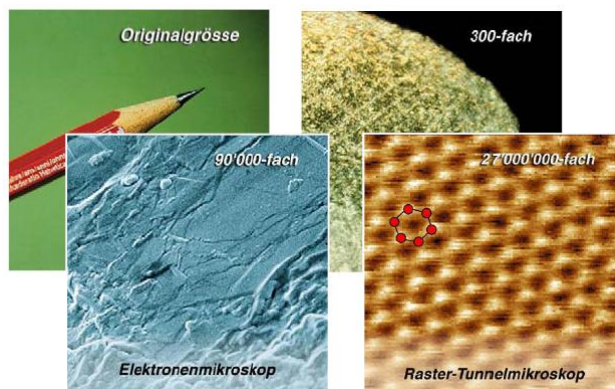
Pásztázás közben a tű minta feletti magasságát (Z pozícióját) egy visszacsatoló hurokkal úgy szabályozza, hogy a mért alagútáram állandóan megegyezzen az $I_{\text{Referencia}}$ értékkel.

Ily módon a tű minden egyes (X,Y) pozíciójához egy meghatározott Z érték fog tartozni. Ezeket a Z(X,Y) értékeket számítógéppel rögzítjük.

Az STM-ben igen gondos rezgéscsillapításra van szükség, mivel a tűt a minta fölött nanométeres távolságban kell mozgatni. Ha a tű beleütközik a mintába, az általában a tű hegyének és a mintának a sérülését okozza, továbbá, az alagútköz szélességének véletlenszerű változásai "zajként" jelennek meg a felvett képen. A nagyamplitúdójú zaj elfedi a jellemzően 0,01 – 0,1 nm-es atomi korrugációt.

Bár az első STM méréseket ultra nagy vákuumban (UHV) végezték, később kiderült, hogy az alagútmikroszkóp normál levegőn, sőt még (szigetelő) folyadékban is kiválóan működik! Mivel a nem oxidálódó minták (pl. a szén) levegőn vizsgálhatóak, az alagútmikroszkóp egy viszonylag olcsó eszköz, összehasonlítva a modern fizika egyéb mérőeszközeivel, például az elektronmikroszkóppal.

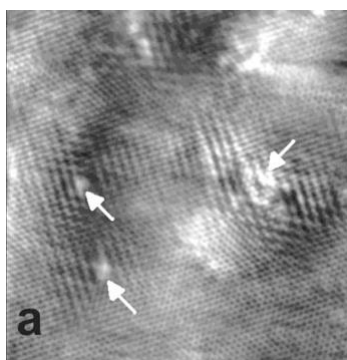
A SZÉN (KARBON) A MIKROSKÓP ALATT



Életnagyság (szabad szemmel) – 300x nagyítás (optikai mikroszkóp) – 90.000x nagyítás (elektronmikroszkóp) – 27.000.000x nagyítás (pásztázó alagút mikroszkóp)

27

GRAFÉN STM KÉPE ATOMI FELOLDÁSSAL



Atomic resolution STM image of an Ar⁺ irradiated graphene sample. White arrows denote the defect sites.

(L. Tapasztó, P. L. Neumann, G. Dobrik, P. Nemes-Incze, G. Vértesy, Z. E. Horváth, G. Molnár and L. P. Biró, MTA-MFA)

28

STM MANIPULÁCIÓ

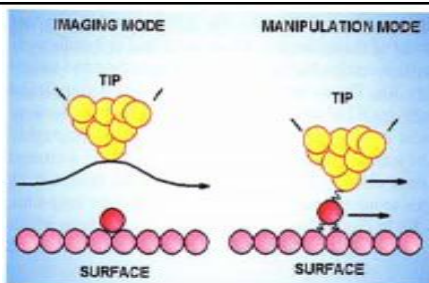
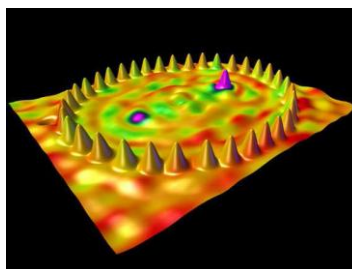
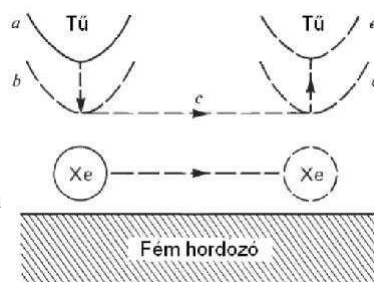
Meg kell keresni a mozgatni kívánt, felületen kötött atomot.

Az STM tűt az atom fölé pozícionálva az alagútáram növelésével csökkenthető a tű és az atom közötti távolság.

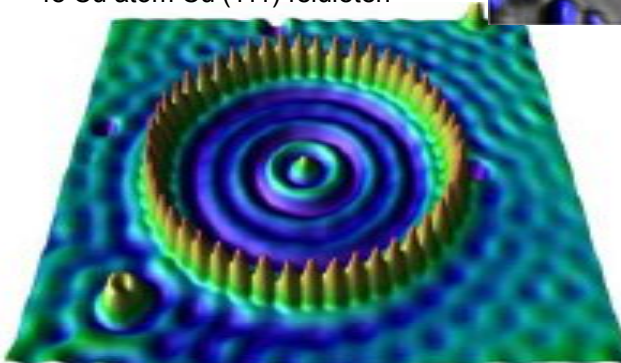
Megfelelő alagútáram értéket beállítva

Az atom együtt fog mozogni tűvel a minta felszínén.

A tűt a kiválasztott pozícióig mozgatva és az alagútáramot lecsökkentve legyengül az atom és a tű közötti kölcsönhatás, és az atom ismét megkötődik a felszínen.

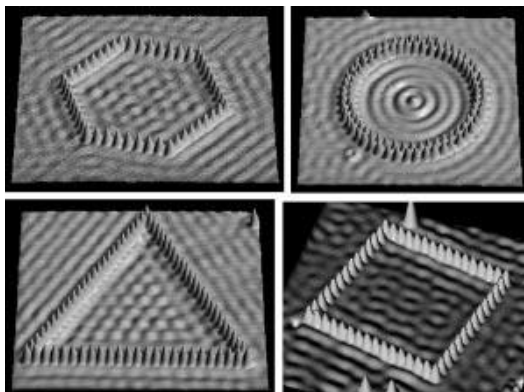


48 Cu atom Cu (111) felületén



25 CO molekula Ni-en

STM: MANIPULÁCIÓ



Réz (Cu) felületén vas (Fe) atomokból STM segítségével kialakított alakzatok ("kvantum karám"). A hullámos szerkezetek a réz felületén az elektronok interferenciajelenségeiből erednek, a különböző geometriákat a felületen lévő Fe atomok alakítják ki.

A képek egyben az elektronok kvantummechanikai hullámtermészetét is demonstrálják.

ATOMERŐ MIKROSKÓP

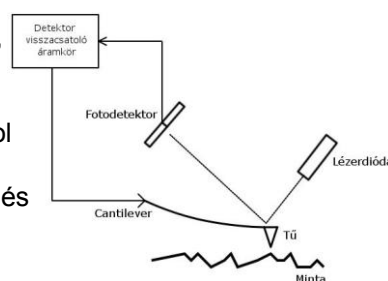
Atomic Force Microscope, AFM. Az AFM működése hasonló a mikrotűs profilmérőkéhez, azonban annál jóval kifinomultabb eszköz.

Egy hegyes tűt a minta felületén mozgatnak.

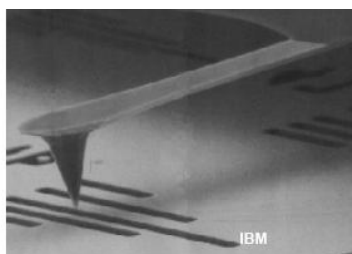
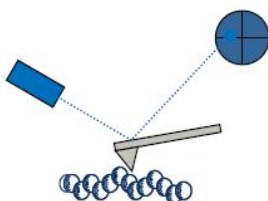
A tű egy vékony, és ezáltal könnyen hajló konzol (cantilever, laprugó) végén helyezkedik el. A tű követi a minta felületén lévő kitüremkedéseket és bemélyedéseket.

Kölcsönhatás: erő (le egészen 10^{-16} N-ig).

Felületi topográfia atomi skálán és atomi felbontással.

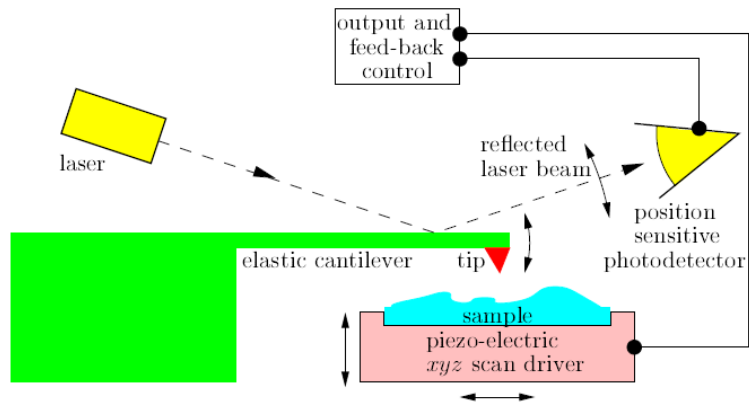


Mérőtű:



32

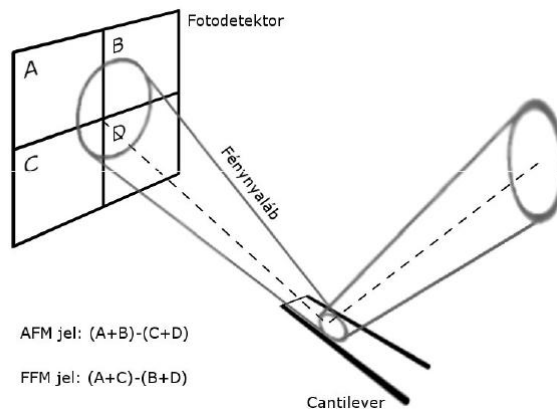
ATOMERŐ MIKROSKÓP



AFM elrendezési vázlata

33

ELMOZDULÁS DETEKTÁLÁSA



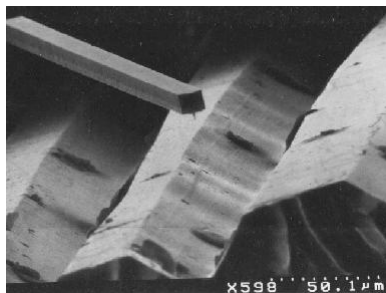
34

ATOMERŐ MIKROSKÓP: A HEGY

A mérőtű hegyének anyaga legtöbbször szilícium vagy szilícium-nitrid.

Előállítása: elektrokémiai maratás vagy fókuszált ionnyalábbal (*Focused Ion Beam*, FIB) történő marás.

Ez utóbbinál a mechanikai úton kialakított hegyre elektromos térben gyorsított ionokat (például argont) lőnek, és ezzel alakítják ki a kis hegygörbületet. Az eljárás előnye, hogy reprodukálható, és jó minőségű végeredményt ad, azonban speciális eszközt igényel.



A scanning electron microscope picture of a silicon based AFM cantilever with a minute tip. The cantilever is shown on a Simon & Garfunkel vinyl record (J. Brugger, IMT Neuchatel, 1994)

35

ATOMERŐ MIKROSKÓP: MI A LÉNYEGES

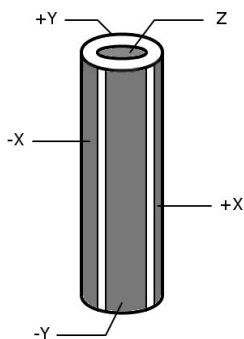
To build a well-functioning AFM several requirements has to be fulfilled:

1. The spring constant of the cantilever should be small enough to allow detection of minute atomic forces.
2. The resonance frequency of the cantilever should be as high as possible to minimize sensitivity to external mechanical vibrations.
3. The tip should be as sharp as possible to allow atomic resolution.
4. The tip should be as narrow as possible to allow penetration into deep troughs on the surface.

36

AFM: AZ ASZTAL MOZGATÁSA

Piezoelektromos elvű mozgatás.



Piezoelektromos kristály (lítium-nióbát, LiNbO_3 , bárium-titanát – BaTiO_3).

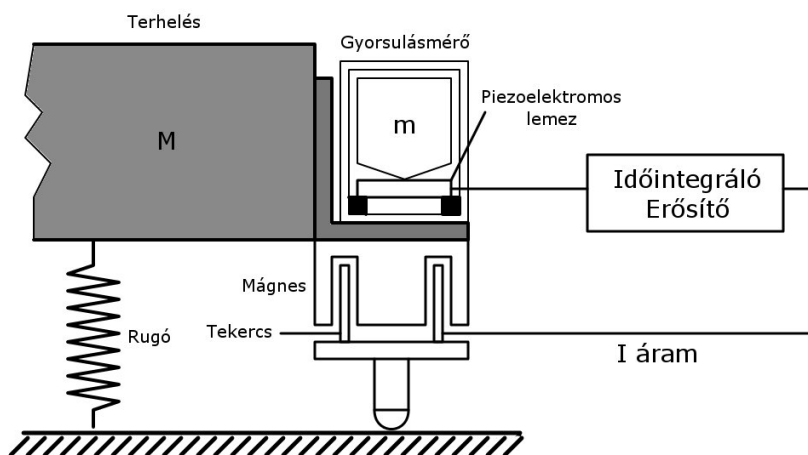
A piezoelektromos együttható tipikus értéke ezeknél az anyagoknál 10^{10} - 10^{11} m/V.

Így a piezoelektromos anyagokkal rendkívül pontos pozicionálás végezhető el, feltéve, hogy a maximális elmozdulás kicsi.

Az SPM módszerek esetében leggyakrabban egy speciális kerámiából, ólom-cirkónium-titanátból (PZT) szinterelt hengert használnak.

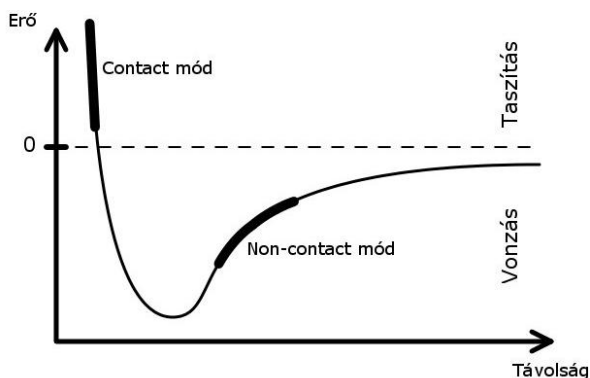
37

AFM: REZGÉCSILLAPÍTÁS ELVI VÁZLATA



38

AFM: KÉPALKOTÁSI MÓDOK



Kontakt: kis rugóállandó (<1 N/m), kis rezonanciafrekvencia
 Nemkontakt
 Tapogató: (tapping) nagy rugóállandó (~ 100 N/m), nagy
 rezonanciafrekvencia (~ 300 kHz)

39

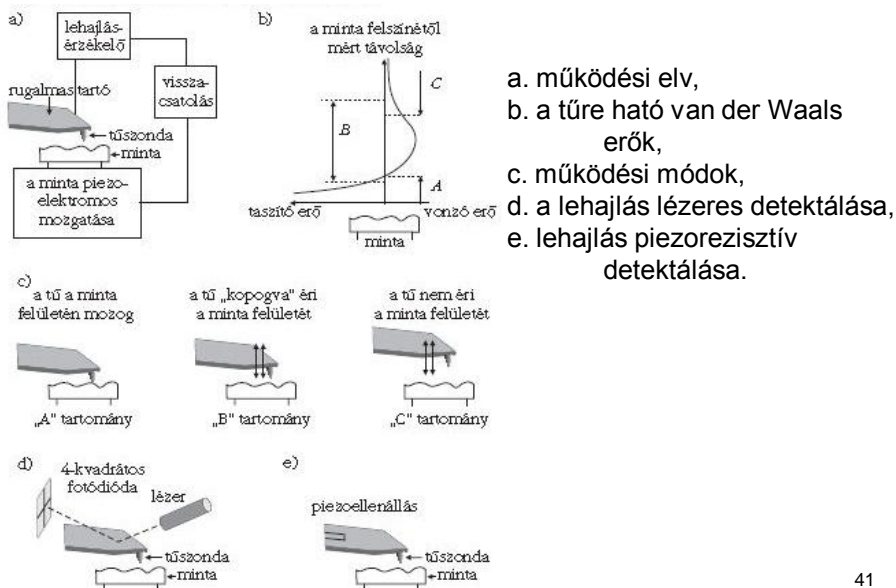
AFM MŰKÖDÉSE

A mozgató rendszert piezokristályok segítségével alakítják ki. A detektáló rendszer a mérőrugó elmozdulását letapogató, lézer fény visszaverődést érzékelő elektronikából áll. A felszínhez közelítve a tűre először vonzó erő hat, ami taszítóvá válik - kellően közel kerülve a mintához. Ha ábrázoljuk az erő változását a távolság függvényében, akkor láthatjuk, hogy először a tű és a felület között fellépő erők vonzó erők, amelyek közelítve a mintához taszítóvá válnak.

Ahol az erőgörbe a tengelyt metszi, ott éri el a tű a felületet. Ha a rugó a felszín felett haladva a változó erők hatására elhajlik, a visszacsatoló elektronika úgy módosítja a piezokristály z irányú deformációját, hogy a rugó az eredeti állapotába visszatérjen. (A visszacsatoló elektronika gyorsasága felső határt szab a pásztázási frekvenciának.) Ezáltal felvehető a z irányú piezofeszültség $U_z(x,y)$ függvénye, ami megfelel a felület topográfiájának, feltéve, hogy a tűre ható erő csak a tű és a felszín közötti távolságtól függ (az esetek nagy részében ez fennáll).

40

AFM MŰKÖDÉSE



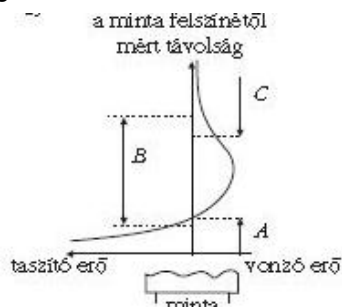
41

AFM ÜZEMMÓDJAI

A szondakar mintához viszonyított magasságát a visszacsatoló körrel lehet szabályozni. Amikor a tűszonda a minta felszínét éri, akkor a taszítóerőket használjuk a felület egyenetlenségeinek leírására.

Puha mintafelületek esetén ez az üzemmód a minta megkarcolását vonhatja maga után, szerencsére a vonzó erők tartományában is ("B" és "C" tartomány) lehet működtetni a mikroszkópot. Ilyenkor a szondakart a sajátfrekvenciájának megfelelő rezgésbe hozzák és a vizsgált felület a szondakar rezgésének amplitúdóját vagy a frekvenciáját változtatja meg, ez szolgál a mérés vagy képalkotás alapjául.

Alapesetben a szondakar lehajlását mérik; a két leggyakrabban alkalmazott detektálást a lézersugárzást érzékelő fotodióda, illetve a szondakarban ébredő mechanikai feszültség piezorezisztív detektálása..



42

FELBONTÁS

A felbontóképességet az AFM-gyártók számszerűen nem szokták megadni, mert azt a minta síkjában a tűszonda mérete és a felület tulajdonságai együttesen határozzák meg. Minél kisebb a szonda lekerekítési sugara, annál jobb felbontás érhető el. Ha még azt is hozzávesszük, hogy olyan tűszonda, amely egyetlen atomban végződik, nem számít kurióznak, akkor bizony nanométernél kisebb felbontásra számíthatunk.

A minta felületére merőleges irányban meg szokták adni, hogy a pásztázó mechanika mekkorára korlátozza a felbontást, és ez általában 0,05 nm.

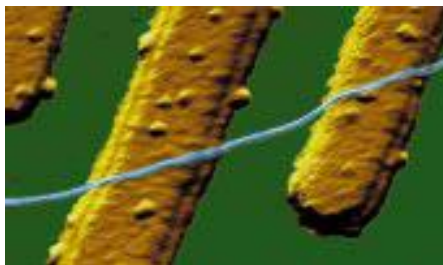
A kristályrács atomjai megjeleníthetők, ha az atomerő-mikroszkópot ultravákuum-körülmények között alkalmazzák.

Lényeges, hogy a tűsugárral működő mikroszkópoknál nincs lencse, és ennek következtében nincsenek lencsehibák. Ugyanakkor nem kellő vékonyságú tű használata műtermékek képződéséhez vezethet.

Általánosságban elmondható, hogy AFM felbontóképessége körülbelül ezerszer jobb, mint a fénymikroszkópé, és ha ez utóbbit 200 nm-nek vesszük, akkor az AFM felbontóképessége a minta síkjában 0,2 nm. A minta felületére merőleges irányban jobb, körülbelül 0,05 nm.

43

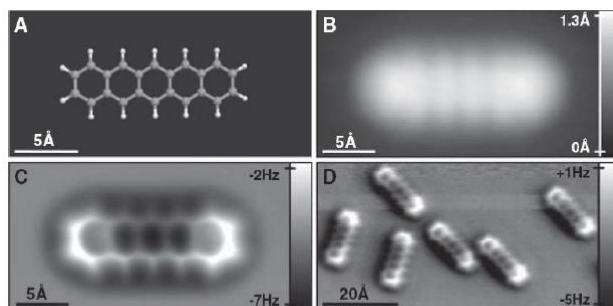
AFM ALKALMAZÁSI PÉLDA: SZÉN NANOCSŐ (CNT)



Atomic-force image of an individual single-wall carbon nanotube about 1 nm in diameter, connected to two 15-nm-thick electrical leads for electrical measurements. The total length of the tube is 3 μm , with a section 140-nm long between the contacts.

44

AFM ALKALAMZÁSI PÉLDA: MOLEKULA SZERKEZETE



Molekula kémiai szerkezetének leképezése atomerő mikroszkóppal

45

KÖZELTÉRI OPTIKAI MIKROSKÓP

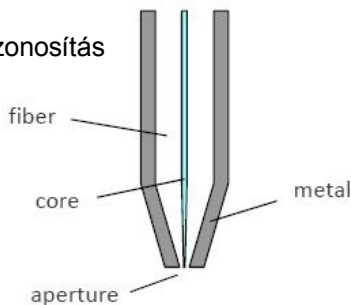
Scanning Near-Field Optical Microscope SNOM

Szonda: fény

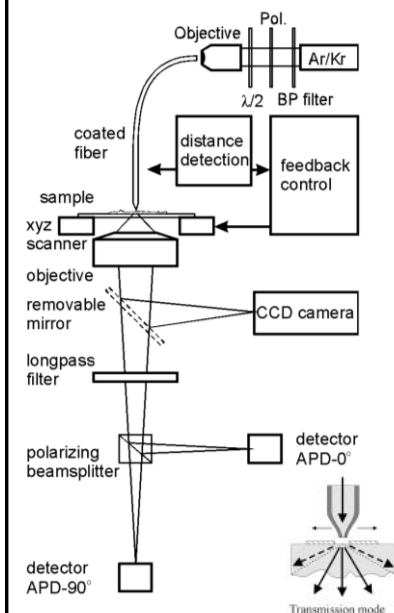
Kölcsönhatás: optikai tulajdonságok, úm. abszorpció, fluoreszcencia, kettőtörés

Felbontóképesség: tipikusan 30-100 nm

Spektroszkópia: kémiai azonosítás



KÖZELTÉRI OPTIKAI MIKROSKÓP

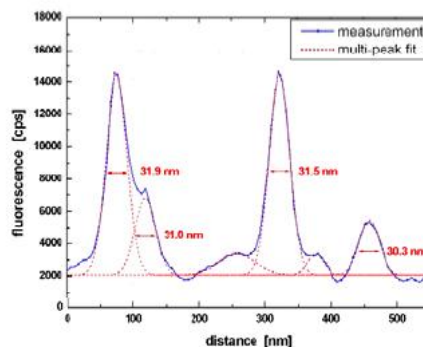
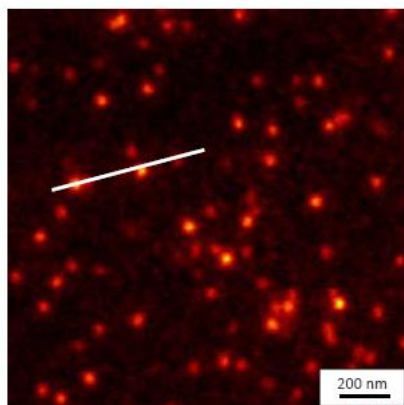


Setup of an aperture type near-field scanning optical microscope (NSOM) with a metal coated tapered fiber in the collection mode. The scanning sample stage is mounted on top of an inverted optical microscope. The distance between tip and sample is controlled using a shear-force sensor mounted to the fiber (see further). The transmitted light is collected over a large angle by a special objective. The resulting beam is led through a filter transmitting fluorescent light from the surface only. The fluorescence is divided over two detectors to obtain information on the polarization.

47

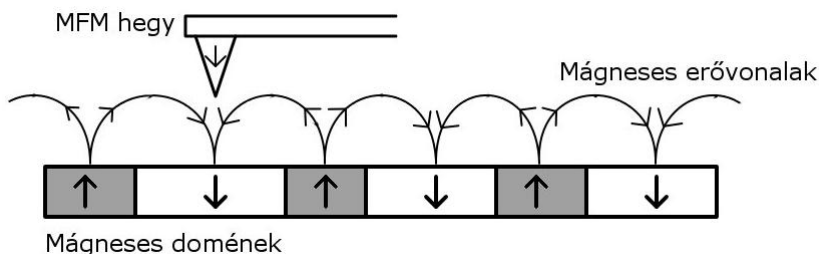
NSOM ALKALMAZÁS

Rabbit IgG/Alexa - SNOM with μ fab probes



32 nm FWHM resolution by SNOM
(47 brightest molecules: 31.7 ± 3.6 nm)

MÁGNESES MIKROSKÓPIA: MAGNETIC FORCE MICROSCOPY MFM



Mágneses doménszerkezetek mérésére használható.
Történetileg először maratott mágneses anyagból (tipikusan nikkel) készült a tű.

A modern tűk általában szilícium-nitridből készülnek, mágnesezhető, kb. 50 nm vastag réteggel – nikkelből vagy kobaltból.

Megbízható mérés feltételei:

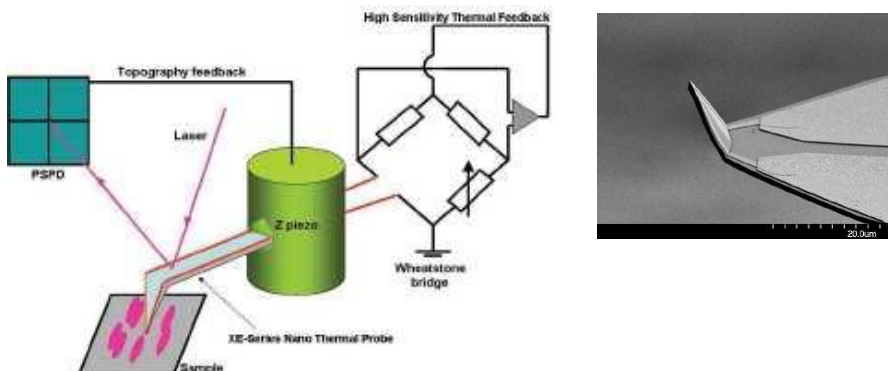
- a mágneses dipólmomentum ne változzon a mérés alatt
- ha rezonancia-módban üzemeltetjük, akkor a rezonanciafrekvencia közelében tartjuk a konzolt.

49

SCANNING THERMAL MICROSCOPE

Scanning Thermal Microscope, SThM

Termikus tulajdonságok mérésére: hőmérséklet, hővezetőképesség, hőkapacitás



50