

# Megmutatni a nehezen láthatót: Két Nobel-díjas kísérlet demonstrációs célú megvalósítása

Sánta Botond

TDK dolgozat, MSc II. évfolyam

Konzulens: Dr. Halbritter András  
egyetemi tanár  
Fizika Tanszék

2015



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2

# Tartalomjegyzék

<b>1. Demonstrációs célú diffúziós ködkamra</b>	<b>2</b>
1.1. Bevezetés . . . . .	2
1.2. A ködkamra hűtése . . . . .	3
1.2.1. A Peltier-elem . . . . .	4
1.2.2. A Peltier-elemek meghajtása . . . . .	5
1.3. A ködkamra felépítése . . . . .	7
1.4. Kísérletek a diffúziós ködkamrával . . . . .	11
1.4.1. Részecskék által keltett ködfonalak jellemzői . . . . .	11
1.4.2. A ködkamrában alkalmazott sugárforrások . . . . .	12
1.4.3. Sugárzások abszorpciója . . . . .	14
1.4.4. Sugárzások elektromos térrel való eltérítésének vizsgálata . . . . .	15
1.5. A demonstrációs célú ködkamra bemutatása . . . . .	16
<b>2. Demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkóp</b>	<b>20</b>
2.1. Bevezetés . . . . .	20
2.2. A demonstrációs STM felépítése . . . . .	21
2.2.1. A mérőfej felépítése . . . . .	21
2.2.2. Áramerősítő készítése . . . . .	24
2.2.3. A demonstrációs STM vezérlése . . . . .	27
2.2.4. Rezgésmentesítés . . . . .	30
2.2.5. Közelítés és monitorozása USB mikroszkóppal . . . . .	33
2.2.6. Túlhegyezés . . . . .	36
2.3. Demonstrációs STM-hez készített minták . . . . .	37
2.3.1. Vákuumpárologtatott arany minta . . . . .	37
2.3.2. Vákuumpárologtatott DVD minta . . . . .	38
2.4. A demonstrációs STM bemutatása . . . . .	41
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>49</b>

# Összefoglaló

A fizika oktatásában és népszerűsítésében alapvető szerepet játszanak a demonstrációs kísérletek, azonban a legtöbb látványos kísérlet a klasszikus fizika témaköréhez kapcsolódik. TDK dolgozatomban olyan kísérleti eszközök fejlesztését mutatom be, melyek a XX. századi modern fizika két fontos kísérleti vívmányát mutatják be demonstrációs céllal.

A Wilson-féle ködkamrát C. T. R. Wilson skót fizikus találta fel 1911-ben, melyért 1927-ben Arthur Compton-nal megosztva fizikai Nobel-díjban részesült. Az eredeti ködkamrát később számos továbbfejlesztett detektor követte, melyek nagyban hozzájárultak a mag-és részecskefizika fejlődéséhez, és egyben lehetővé tették az ionizáló sugárzások vizuális megjelenítését.

A pásztázó alagútmikroszkópot (STM) 1981-ben fejlesztette ki Gerd Binnig és Heinrich Rohrer, amiért fizikai Nobel-díjat kaptak 1986-ban. Ugyan a XX. század elején már számos kísérlet bizonyította, hogy az anyag atomokból épül fel, az anyag atomi felbontású mikroszkopikus feltérképezése először az alagútmikroszkóp segítségével vált lehetővé.

TDK munkám során ezen két kísérleti eszköz egyszerűsített, demonstrációs célú változatát valósítottam meg. Megterveztem és kiviteleztem egy folyamatos üzemű, diffúziós ködkamrát, annak minden részegységével és vezérlésével együtt. A ködkamrában lévő túlhűtött gőz létrehozásához félvezető Peltier-elemeket alkalmaztam. A ködkamra vezérléséhez és a mérések elvégzéséhez C# környezetben készítettem egy vezérlő és kiértékelő szoftvert. Végezetül demonstrációs kísérleteket végeztem el az elkészített ködkamrával.

Munkám során megterveztem és kiviteleztem egy komplett, demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkópot. Az eszköz stabilitását egy kis tömegű, saját készítésű rezgésmentesítő állvány biztosítja. A berendezést vezérlő elektronika egyes részei, valamint az áramerősítő áramkör kivitelezése szintén az elvégzett munkám része. A kész műszeren stabilitási és egyéb képalkotással kapcsolatos méréseket végeztem, illetve a műszer működését különböző struktúrájú minták segítségével demonstráltam.

Mindkét műszer fejlesztésénél külön figyelmet szenteltem arra, hogy azok könnyen bemutathatók legyenek nyílt napokon és egyéb kísérleti bemutatókon.

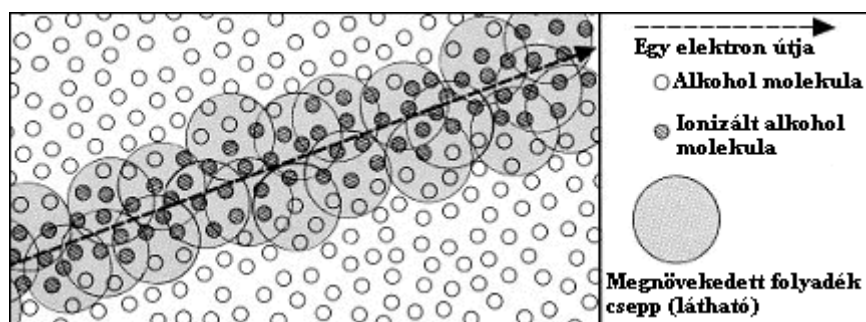
# 1. fejezet

## Demonstrációs célú diffúziós ködkamra

### 1.1. Bevezetés

A radioaktív sugárzások jelenléte a környezetünkben döntően természetes eredetű. Fő forrásuk a Napból és világrűrből származó kozmikus sugárzások, illetve a Föld belsejéből származó radioaktív nehéz elemek. A radioaktivitás érzékszerveinkkel közvetlenül nem érzékelhető, ugyanakkor kimutatása és mérése fontos feladat.

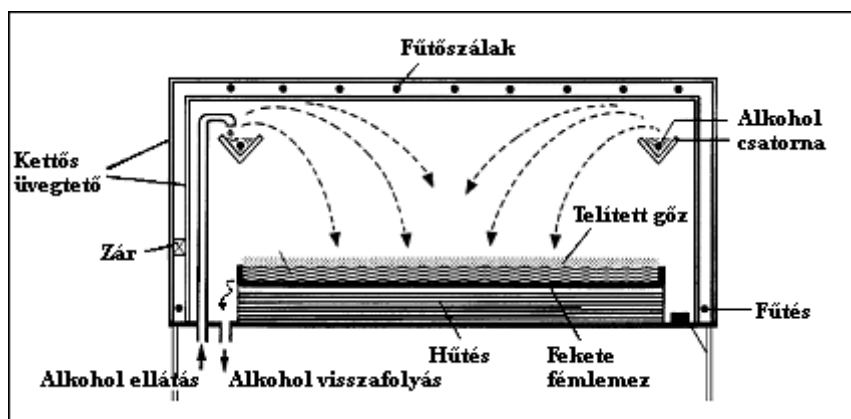
A ködkamra egy olyan különleges nukleáris detektortípus, amely az ionizáló sugárzásokat közvetlenül láthatóvá teszi. Az eredeti Wilson-féle kamrában vízgőzt hoztak túlűtött állapotba, egy dugattyúval történő gyors expanzió segítségével [1]. Az eszköz megalkotóját - C. T. R. Wilson skót fizikust - 1927-ben Arthur Comptonnal megosztva fizikai Nobel-díjban részesítették.



1.1. ábra. A ködfonalképződés folyamata.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>[2], 23 old., 3.ábra

A ködkamrában túlhűtött gőzréteget hozunk létre expanzióval vagy hűtéssel; ez a detektor érzékeny térfogata. A túlhűtött állapot egy metastabil állapot, perturbáció hatására fázisátalakulás jön létre. Amikor egy ionizáló részecske halad át ezen a túlhűtött rétegen, akkor a trajektóriája mentén ionizálja a gőzrészecskéket, aminek hatására apró folyadékcseppek képződnek. Ezeket nevezzük kondenzációs magvaknak. A magvak környezetében lévő gőz kondenzációja tovább növeli a csepp méretét, így képződik szabad szemmel látható méretű csepp. Ezekből a cseppekből épülnek fel a ködfonalak. A ködfonalak képződésének folyamatát az 1.1 ábra szemlélteti [2].



1.2. ábra. Egy diffúziós ködkamra sematikus felépítése.<sup>2</sup>

Amíg a Wilson-féle kamrában csak pillanatfelvételeket lehetett készíteni az expanzió miatt, addig a diffúziós ködkamrában a kamra tetejéből folyamatosan a hűtött oldal felé áramló, majd ott kondenzálódó alkohol miatt folyamatos üzemű működtetés is lehetővé válik. Egy ilyen ködkamra kamra részét vázolja sematikusán az 1.2 ábra.

A kamrában kialakuló ködfonalak mérete, alakja karakterisztikus az adott részecskére nézve. A ködfonalak vastagsága elsősorban az adott részecske ionizációs képességétől, a hossza pedig a részecske kinetikus energiájától függ. Az egyes részecskék által keltett ködfonalak jellemzőiről az 1.4.1 részben írok részletesen.

## 1.2. A ködkamra hűtése

Ködkamrát viszonylag egyszerűen lehet építeni, amennyiben rendelkezésre áll szárazjég vagy folyékony nitrogén. Akár házilag is könnyen összeállítható ködkamrát ír le a

<sup>2</sup>Forrás: [3], 2. oldal, 2. ábra

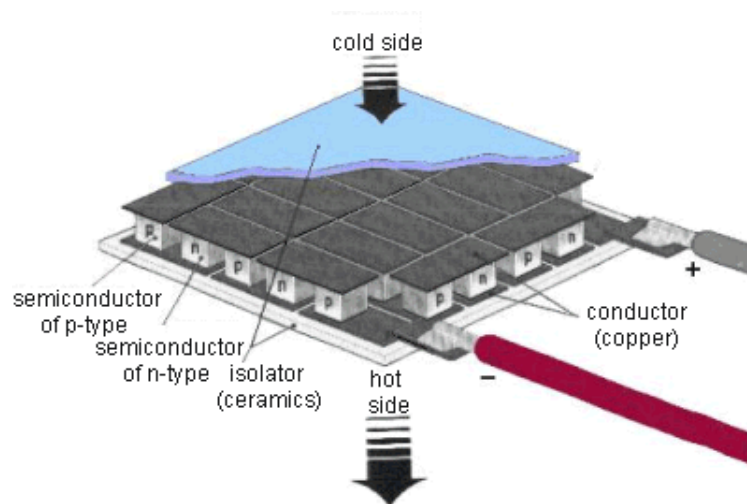
CERN által tartott *workshop* [4]. Nagy hátránya a szárazjéggel és folyékony nitrogénnel működtetett ködkamráknak, hogy időnként utántöltést igényelnek, illetve hosszabb működtetés esetén meg kell oldani a hűtőközeg tárolását is, nem beszélve azok szállításáról és beszerzéséről.

Gyári ködkamrák esetében, mint a *PHYWE PJ45* típusú ködkamra kompresszoros hűtést alkalmaznak. Ennek nagy előnye, hogy gyakorlatilag folyamatos, utántöltés nélküli működtetést tesznek lehetővé, általában nagy hűtött felülettel [5]. Hátrányuk, hogy nagyok és zajosak, valamint az árak is meglehetősen magasak.

Alternatív megoldás lehet folyamatos üzemű ködkamra hűtésére félvezető Peltier-elemek használata. A dolgozatomban megépített ködkamra hűtését is Peltier-elemekkel valósítottam meg.

### 1.2.1. A Peltier-elem

A Peltier-elem egy félvezető eszköz, mely elektronikus hőszivattyúként működik. Tipikus felhasználása hordozható hűtőtáskák, processzorhűtők, lézerek hűtésénél történik. Előnyei a széleskörű vezérelhetőség, a zajmentesség, a hőáramlás irányának változtathatósága, illetve a mozgó alkatrészek hiánya. Hátrányai közé tartozik, hogy drága, törékeny, kis teljesítmény és felület jellemzi a kompresszoros hűtéssel szemben. Felépítése több, egymással sorba kapcsolt félvezető pn-átmenettel történik, melyeket vékony kerámialapok (tipikusan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) közé rögzítenek. (1.3 ábra).



1.3. ábra. A Peltier-elem felépítése. <sup>3</sup>

<sup>3</sup>Forrás: [http://ffden-2.phys.uaf.edu/212\\_spring2007.web.dir/sedona\\_price/phys\\_212\\_webproj\\_peltier.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html)

A Peltier-elem működését az alábbi termoelektromos és termikus egyenletek írják le [6]:

$$\dot{Q}_P = I \cdot P \quad (1.1)$$

$$\dot{Q}_J = I^2 \cdot R \quad (1.2)$$

$$\dot{Q}_r = -\lambda \frac{A}{d} (T_m - T_h) = -\Lambda (T_m - T_h) \quad (1.3)$$

ahol  $P$  a Peltier-együttható,  $R$  a Peltier-elem ohmikus ellenállása,  $I$  a ráadott áramerősség,  $A$  a kerámia lapok felülete,  $d$  a lapok távolsága,  $\lambda$  a Peltier-elem hővezetési tényezője,  $\Lambda$  a hőátadási tényező,  $T_m$  és  $T_h$  pedig a Peltier-elem meleg és hideg oldalának hőmérséklete. Az (1.1) egyenlet a Peltier-effektust, az (1.2) egyenlet a Joule-hőt, az (1.3) pedig a Peltier-elem két oldala közti hővezetésből adódó hőáramot jelenti.

Ezen hatásokat összefoglalva a Peltier-elem meleg oldalán leadott ( $\dot{Q}_m$ ) és hideg oldalán elvont ( $\dot{Q}_h$ ) időegységre eső hőmennyiség:

$$\dot{Q}_h = -I^2 \cdot \frac{R}{2} + P \cdot I - \Lambda (T_m - T_h) \quad (1.4)$$

$$\dot{Q}_m = I^2 \cdot \frac{R}{2} + P \cdot I - \Lambda (T_m - T_h) \quad (1.5)$$

Az (1.4) egyenletben a Joule-hő és a hővezetés is veszteséget jelent a hőelvonás szempontjából, míg a (1.5) egyenletnél a meleg oldalon létrejövő hőteljesítménynél a Joule-hő és a hőszivattyú hőárama is hőt szállít a meleg oldalra. Az egyenleteknél a Joule-hőt úgy vesszük, mintha a Peltier-elem mindkét oldalára egyenletes mértékben termelne hőt, ezért van az egyenletekben egy  $\frac{1}{2}$ -es faktor.

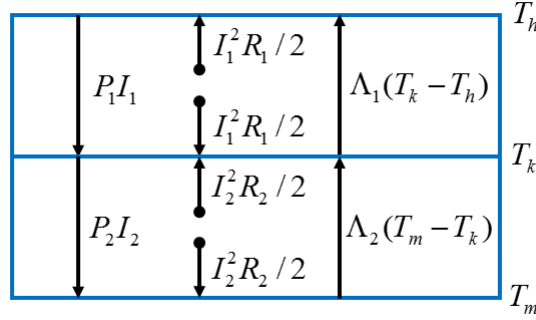
Mint látható, alapvetően a Peltier-elem árama határozza meg az egyes hőáramokat, így érdemes a Peltier-elemet áramgenerátoros tápegységgel működtetni. Azt is könnyű észrevenni, hogy (1.2) egyenletben lévő  $I^2$  miatt nem érdemes túl nagyra venni az átfolyó áramot, ugyanis a veszteség négyzetesen növekedni fog.

### 1.2.2. A Peltier-elemek meghajtása

Egy egyszerűsített modell segítségével vizsgáljuk meg egy Peltier-elem működését! Ha a hűtött oldalt  $\dot{Q}_f$  fűtőteljesítmény éri, akkor az 1.4 egyenlet alapján a fűtő és hűtőteljesítmények egyensúlyára

$$\Lambda(T_m - T_h) + \dot{Q}_f = P \cdot I - I^2 \frac{R}{2} \quad (1.6)$$

egyenletet írható fel, ahol a jobb oldal  $I_{max} = \frac{P}{R}$  áramnál maximális, azaz zérus  $\dot{Q}_f$  fűtőteljesítmény esetén  $T_m - T_h = \frac{P^2}{2R\Lambda}$  maximális hőmérsékletkülönbség érhető el.



1.4. ábra. Hőtanilag sorba kötött Peltier-elemek elrendezése.

Nézzük meg, hogy el tudunk-e ennél jobb eredményt érni két darab, egymással hőtanilag sorba kötött Peltier elem segítségével (lásd 1.4 ábra)! A felső (alsó) Peltier-elem paramétereit jelöljük 1 (2) indexekkel, és továbbra is nézzük azt a határesetet, amikor a felső Peltier-elem hűtött oldalára jutó fűtőteljesítményt a Peltier-elem belső hővezetése és Joule-hője dominálja, azaz a kívülről jövő fűtés elhanyagolható. Ekkor a hőtani egyensúly

$$\Lambda_1(T_k - T_h) + I_1^2 \frac{R_1}{2} = P_1 I_1 \quad (1.7)$$

képlettel írható fel. A két Peltier elem találkozásánál pedig az 1.4 ábrának megfelelően

$$\Lambda_2(T_m - T_k) + I_2^2 \frac{R_2}{2} + I_1^2 \frac{R_1}{2} + P_1 I_1 = P_2 I_2 + \Lambda_1(T_k - T_h) \quad (1.8)$$

képlet írja le a hőtani egyensúlyt. Ezen két összefüggés összevonásából

$$T_m - T_h = \frac{P_2}{\Lambda_2} I_2 - \frac{R_2}{2\Lambda_2} I_2^2 + \frac{P_1}{\Lambda_1} I_1 - \left( \frac{1}{\Lambda_2} + \frac{1}{2\Lambda_1} \right) R_1 I_1^2 \quad (1.9)$$

írható fel. A jobb oldal  $I_2 = \frac{P_2}{R_2}$  és  $I_1 = \frac{P_1}{R_1} \cdot \frac{\Lambda_2}{2\Lambda_1 + \Lambda_2}$  esetén veszi fel a maximális értékét, ekkor:

$$T_m - T_h = \frac{P_2^2}{2R_2\Lambda_2} + \frac{P_1^2}{2R_1\Lambda_1} \cdot \frac{\Lambda_2}{2\Lambda_1 + \Lambda_1}. \quad (1.10)$$



Jól látszik, hogy az így elérhető hőmérsékletkülönbség nagyobb, mint ha csak az alsó Peltier-elemet használnánk a legnagyobb hőmérsékletkülönbséget biztosító  $I_{max} = \frac{P}{R}$  áram mellett. Az is látszik, hogy  $\Lambda_1 \sim \Lambda_2$  esetén az felső Peltier-elemet hármaskorral kisebb árammal érdemes hajtani, mint ha csak ezzel az egy Peltier-elemmel akarnánk maximális hőmérsékletkülönbséget elérni, míg az alsó elemre ugyan azt az  $I_{max}$  áramot érdemes kapcsolni, mintha csak az alsó elemet használnánk.

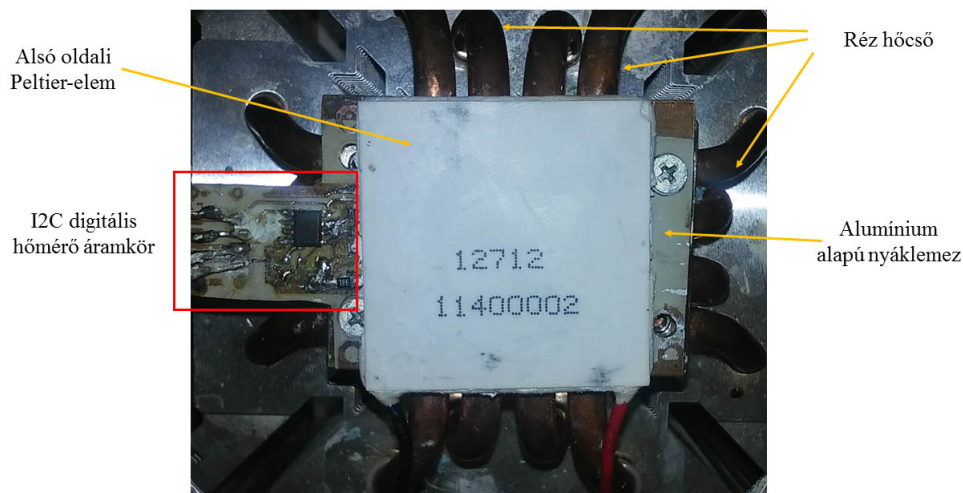
A fenti modell számos egyszerűsítést tartalmaz, hiszen zérus  $\dot{Q}_f$  fűtőteljesítménnyel számol, és nem veszi figyelembe a  $P, R, \Lambda$  együtthatók hőmérsékletfüggését, azt azonban demonstrálja, hogy két Peltier-elemmel nagyobb hőmérsékletkülönbség érhető el, mint egyvel. Ezen megfontolásokkal összhangban kísérleteim alapján is arra a következtetésre jutottam, hogy két Peltier-elemet kell használni, egyetlen Peltier-elemmel nem sikerült a ködkamra működéséhez szükséges hűtést megvalósítani. A kísérleti optimalizálás olyan szempontból is összhangban van a fenti megfontolásokkal, hogy a legnagyobb hőmérsékletkülönbség valóban akkor érhető el, ha az alsó Peltier-elemet a specifikált  $I_{max}$ -hoz közeli árammal, míg a felső Peltier-elemet a specifikált  $I_{max}$  áram mintegy egyharmadával hajtjuk.

### 1.3. A ködkamra felépítése

A Peltier-elemek alsó oldalára egy *SCNJ-3100* típusú passzív hűtőborda csatlakozik, amely nyolc darab hőcső segítségével vezeti el a meleg oldalon keletkező hőáramot. Ez a hűtőborda egy hideg vízzel teli edényben helyezkedik el, amely nagy hőkapacitása révén lassan melegszik, és kvázi állandó alacsony hőmérsékletet biztosít a bordának és a Peltier-elemeknek. Egy 10 literes,  $18^\circ\text{C}$ -os csapvízzel történő feltöltéssel a kamra képes másfél óra működésre is.

Kritikus rész volt a ködkamra tervezésénél a hőmérséklet mérése. Fontos volt, hogy közvetlenül a hőszivattyúk hideg és meleg oldalán mérjem a hőmérsékleteket, amely geometriai okokból nem volt könnyen kivitelezhető. A megoldást végül az adta, hogy behelyeztem egy nyáklemet a két Peltier-elem közé, amelyen a hőmérőáramkör is ki lett alakítva (lásd 1.5 ábra).

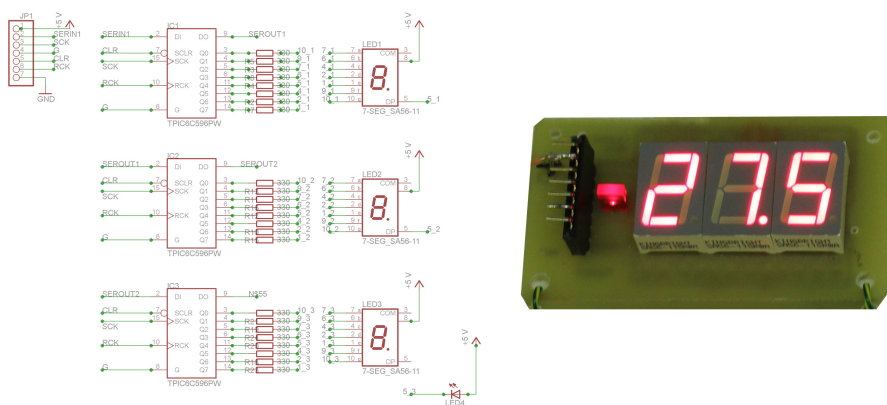
A jó hővezetés érdekében alumínium alapú nyáklemet alkalmaztam, így a mért hőmérsékletek jó közelítéssel a Peltier-elemek hideg és meleg oldalán kialakuló hőmérsékleteket adják. A felületi egyenetlenségekből adódó rossz hőkontaktus kiküszöbölésére vékony



1.5. ábra. A Peltier-elem és az alatta elhelyezkedő, alumínium-nyáklemez alapú hőmérő áramkör.

hővezető pasztaréteget vittem fel a nyáklemezek és a Peltier-elemek közé. A hűtött oldalt is - vagyis a fém lapot, ami felett a túlhűtött gőzréteg jön létre - a legfelső ilyen hőmérő áramkör alumíniumlemeze adja.

A Peltier-elemek korábban vázolt  $T_h$ ,  $T_k$ ,  $T_m$  pontjain mért hőmérsékletek monitorozására egy, a Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Kör munkacsoportja által tervezett és megépített mikrokontroller alapú fejlesztőpanelt használtam. Bár a hardvert nem én fejlesztettem, az *ATMEGA8* mikrokontroller programozását C nyelven én kiviteleztem.



1.6. ábra. Az általam tervezett és megépített hétszegmenses kijelző kapcsolási rajza, és a megépített áramkör.

A digitális hőmérők által mért hőmérsékletek kiolvasása mellett ezt az áramkört használtam egy általam tervezett és fejlesztett hétszegmenses kijelző működtetésére is (1.6 ábra). Három darab azonos, három és fél *digit*-es kijelzőt építettem, melyekkel a ködkamra hűtésekor nyomon követhető az egyes hőmérsékletek változása. Egyúttal monitorozási célt is szolgál ez az interfész, hiszen ha túlságosan felmelegedne a hűtővíz, akkor ez a kijelzőről könnyen leolvasható, és szükség esetén a felmelegedett víz könnyen lecserélhető.

A ködfonalak megfelelő megvilágítása szintén nagyon kritikus volt. Ideálisnak tekinthető egy keskeny résen át világító, nagy fényerejű, homogén eloszlású fényforrás, amely csakis a néhány mm-es túlhűtött réteget világítja meg, egyenletesen [7]. A gyakorlatban nagy fényerejű *SMD*<sup>4</sup> *LED* sort alkalmaztam, mely a szilikonos védőrétegnek köszönhetően vízálló kivitelű is. Ez igen előnyös tulajdonság, hiszen a kamrában az alkohol gőz kondenzációja miatt elektromos rövidzár is kialakulhatna. A fényforrás mindenféle tükröződését meg kell előzni, ezért a *LED* sor fölé egy fekete műanyag gyűrű került, amely így a kitakarja megfigyelő felé érkező direkt megvilágítást. A *led* sor, mivel igen sok fény kibocsátó diódát tartalmaz, melyek különböző szögből világítják meg az érzékeny térfogatot, kiváló megvilágítást biztosítva.

A ködkamrában lévő zavaró ionok és szennyeződések a kamrában megakadályozhatják a ködfonalképződést, ezért szükséges egy külső elektromos tér alkalmazása, mely ezeket a szennyeződések kivonja a hűtött térfogatóból [7]. A külső teret egy 1 kV-os nagyfeszültségű tápegység segítségével hoztam létre. A feszültségforrás földjét a hűtőbordára csatlakoztatom, a pozitív elektróda pedig az üvegbúra belső részén kialakított elektródára került.

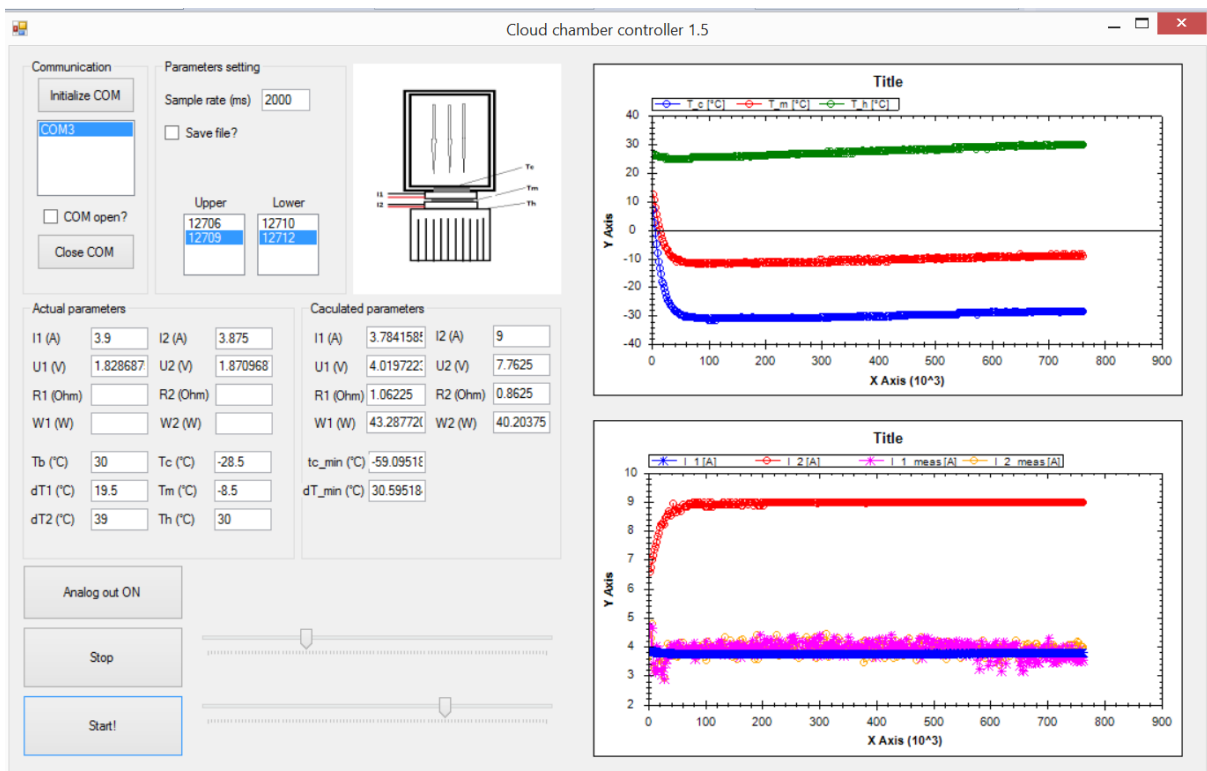
Az izopropil-alkohol a kamra tetején található szivacsrétegből párolog a hideg oldal felé. Mivel kamra rész hermetikusan zártnak tekinthető, ezért az alkoholveszteség minimális. Egy 10 ml-es alkohol feltöltéssel a ködkamra órákig üzemeltethető. Ugyanakkor lehetőség van az alkohol utántöltésére, egy külön erre a célra kialakított üveg csap segítségével, mely az üveghenger felső oldalán helyezkedik el.

A ködkamra vezérléséhez egy általam *C#* nyelven megírt programot használtam. A program a mikrokontrollerrel *UART*<sup>5</sup> protokollon keresztül kommunikál. A mikrokontroller a digitális hőmérők lekérdezésén kívül még visszaméri a Peltier-elemeket meghajtó tápegységek által kiadott feszültség- és áramértékeket is. Így lehetőségem van PC-s adatgyűjtésre is. A vezérlőprogram kezelőfelületét és annak legfontosabb funkcióit az 1.7 ábra mutatja.

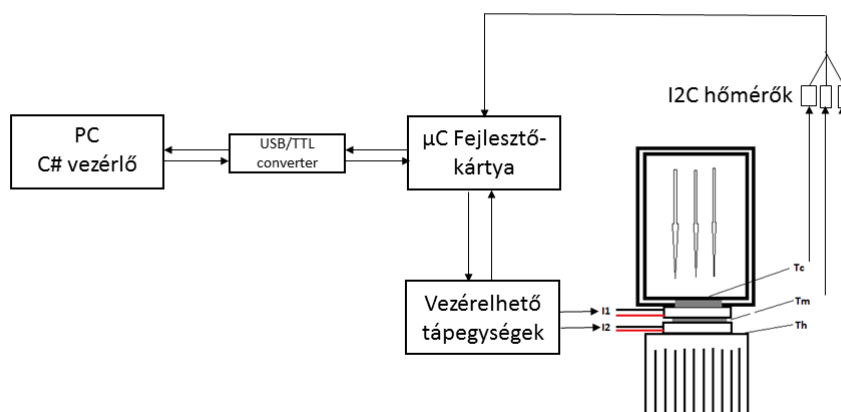
---

<sup>4</sup>SMD = Surface Mounted Device, magyarul felületszerelt alkatrész

<sup>5</sup>UART = Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, magyarul univerzális aszinkron adóvevő



1.7. ábra. Az általam C# nyelvben megírt ködkamra vezérlő- és adatgyűjtőprogram kezelőfelülete.



1.8. ábra. A demonstrációs célú diffúziós ködkamra vezérlésének blokkvázlata.

A kamrarész alapja egy 10 cm-es átmérőjű, 25 cm magas üveghenger. Ennek rögzítésére esztergált műanyag gyűrűt alkalmaztam a henger alján és tetején. A felső gyűrű rögzíti a záró üvegkorongot. Ez a kialakítás lehetővé teszi, hogy akár oldalról is megfigyelhető legyen a ködkamra, de alapvetően a felülnézet nyújt optimális betekintést.

A megfigyelés történhet szabad szemmel is, de demonstrációk alkalmával egy USB-s csatlakozású kompakt digitális mikroszkóp segítségével jelenítem meg kamrarészt.

## 1.4. Kísérletek a diffúziós ködkamrával

### 1.4.1. Részecskék által keltett ködfonalak jellemzői

Ebben a részben összefoglalom, hogy mely részecskék kimutatása lehetséges az általam megépített diffúziós ködkamrában és mi a jellemző ezen részecskék által keltett ködfonalakra. Ehhez jellegzetes ködfonalképeket mutatok be az 1.9 ábrán.

- $\alpha$  sugárzás

A ködkamrában legjobban az  $\alpha$  részecskék figyelhetőek meg. Nagy kinetikus energiájuknak köszönhetően egyenes vonalban terjednek. A Bragg-görbének megfelelően az ionizáló képességük a sebességük csökkenésével megnő [8]. Mivel ködkamrában kialakuló ködfonalak szélességét alapvetően a részecskék ionizáló képessége határozza meg, ezért az  $\alpha$  részecskék által keltett ködfonalak vége kiszélesedik. Az  $\alpha$  részecskék által levegőben a lefékezésig megtett úthossz arányos a kinetikus energiájukkal, vagyis a keltett ködfonalak hosszával. Egy ökölszabály szerint egy 1 MeV-os  $\alpha$  részecske  $\approx 1$  cm-es úthosszal rendelkezik [1]. Így a ködkamrával becslést is lehet adni a megjelenő részecskék kinetikus energiájára vonatkozóan.

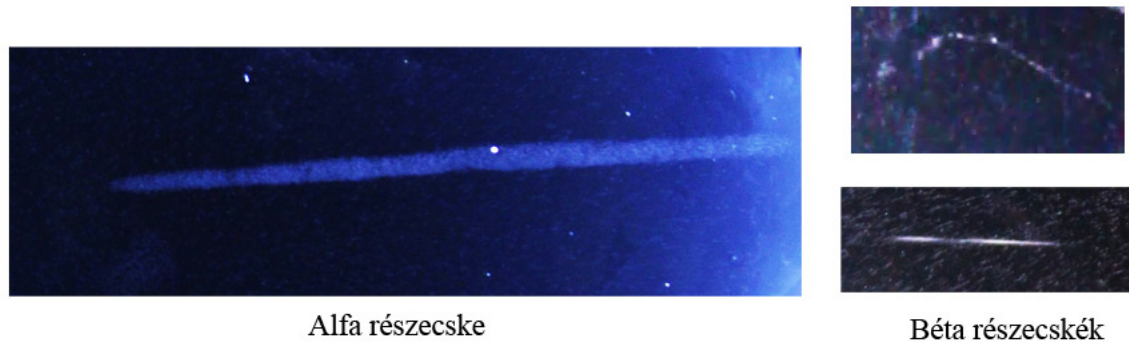
- $\beta$  sugárzás

A  $\beta$  részecskék is jól megfigyelhetőek a ködkamrában. Trajektóriájuk alakja elsősorban a kinetikus energiájuktól függ. Nagy energiás  $\beta$  részecskék (10 keV-1 MeV) kvázi egyenes, kis energiásak (<1 keV) szabálytalan pályát írnak le. A szabálytalan pályát a az atomokon történő rugalmas ütközések okozzák [1]. A  $\beta$  ködfonalak jóval keskenyebbek az  $\alpha$  részecskék által keltettekénél, mivel az ionizációs képességük kisebb.

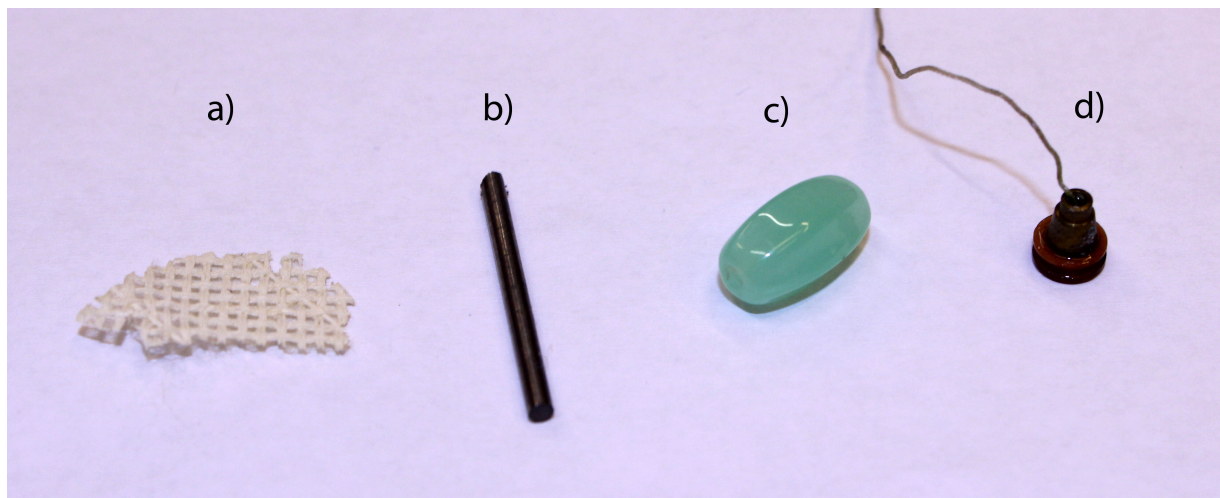
- $\gamma$  sugárzás

Ezen a részecsketípus megfigyelhetősége a ködkamrában csekély, ugyanis  $\alpha$ ,  $\beta$  és  $\gamma$

sugárzások közül a  $\gamma$  rendelkezik a legkisebb ionizáló képességgel. Anyaggal történő kölcsönhatásai során (párkeltés, Compton-szórás, fotoeffektus) keletkező  $\beta^\pm$  részecskék keltenek közvetlenül ködfonalakat a kamrában [1].



1.9. ábra. A  $^{210}\text{Pb}$  forrásból származó  $\alpha$  és  $\beta$  részecskék által keltett jellemző ködfonalak. Az ábrán a  $\beta$  részecskék nagyítva vannak a jobb láthatóság miatt. A jobb felső kép egy kis energiás, a jobb alsó pedig egy nagy energiás  $\beta$  részecske trajektóriát ábrázol [2].



1.10. ábra. A ködkamrában használt radioaktív sugárforrások: a) gázharisnya, b) tóriumos hegesztőpálca, c) uránüveggyöngy, d)  $^{210}\text{Pb}$ -es izotóp

#### 1.4.2. A ködkamrában alkalmazott sugárforrások

A radioaktív demonstrációs kísérletek elengedhetetlen kellékei a sugárforrások. Természetesen megfelelő körültekintést igényel a források kiválasztása, figyelembe véve a

hatályos jogi szabályozást is. A keresésem során az alábbi nem engedélyköteles sugárforrásokat találtam:

- **Uránüveg-gyöngy**

Különlegessége, hogy az urán tartalma miatt UV fényben zölden fluoreszkál. Ezt a tulajdonságát minden bemutató alkalmával demonstrálom is. Ennek oka, hogy az üveg mátrixban néhány térfogat %-nyi szennyező urán található. Alapvetően a természetben a leggyakoribb  $^{238}\text{U}$  izotóp található a mintában. Ez az izotóp 4,27 MeV-es  $\alpha$  részecskét bocsát ki bomlása során, felezési ideje pedig  $4,468 \cdot 10^9$  év [9]. Az  $\alpha$  részecske csak akkor tud kilépni a mintából, ha az üveg felszínén helyezkedik el a forrás. Mindezekből adódik, hogy a minta aktivitása igen csekély, de ködkamrában egyértelműen kimutatható.

- **Gázharisnya**

Korábban kemping gázlámpásoknál alkalmazták, növelve a gázláng fényerejét. A sugárforrás beszerezhetősége elég nehézkesé vált, mivel manapság már nem kapható kereskedelmi forgalomban. Radioaktivitását a benne lévő  $\text{ThO}_2$ -nak köszönheti. A természetben csak egyfajta tórium izotóp lelhető fel, amely az egyik természetes bomlási sor eleje. A  $^{232}\text{Th}$  100%-ban  $\alpha$  bomló (4,08 MeV),  $14,05 \cdot 10^9$  év felezési idővel [9].

- **Tóriumos hegesztőpálca**

Ma is kereskedelmi forgalomban kapható hegesztéshez használt pálcatípus. Ennél a fajta pálcánál a volfrámból álló elektródák 2-3 %  $\text{ThO}_2$  stabilizátort tartalmaznak. A tórium adalék javítja a hegesztési tulajdonságokat. A gázharisnyánál leírtak vonatkoznak rá.

- **NK-2 jelzésű gyári ködkamra sugárforrása**[7]

A volt NDK területén készült ködkamrához egy komolyabb aktivitású sugárforrást is mellékeltek. A leírás szerint a forrás  $^{210}\text{Pb}$  izotóp, melynek aktivitása 1973-ban  $0,2 \mu\text{Ci}$  volt, ami 7,4 kBq-nek felel meg. Mivel a felezési ideje 22,2 év, ezért a mai aktivitása ennél lényegesen kisebb, mindössze 1 kBq. Az izotóp bomlási sorát az 1.1 táblázat tartalmazza [9]. A forrás megfelelően nagy aktivitású, figyelembe véve a ködkamra  $\sim 1$  s-os holtidejét [2]. Gyakorlatilag mind a három alap sugárzástípusát kibocsátja ( $\alpha, \beta^-, \gamma$ ).

Ezen preparátum kifejezetten ködkamrához készült, ami a kialakításán is látszik (1.10 ábra). Hengeres hordozóra vittek fel vékonyrétegű, nagy aktivitású  $^{210}\text{Pb}$  izotópot, tehát a minta radiálisan, egy keskeny sávban sugároz. Így a kibocsátott

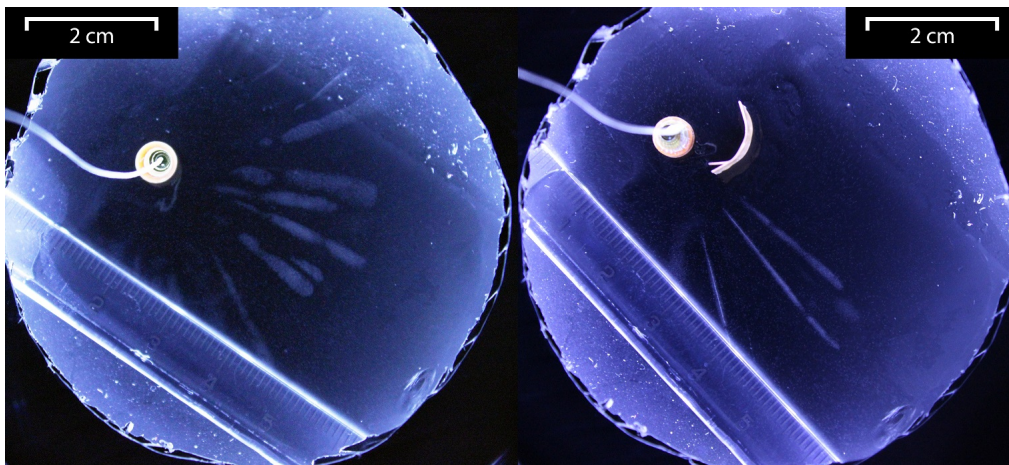
részecskék nagy része a túlhűtött rétegben nyelődik el. A vékonyrétegű kialakításnak köszönhetően kiküszöbölésre került az önárnyékolás, mely az  $\alpha$  sugárforrások készítésének legnagyobb kihívása.

Elem	Felezési idő	Bomlási mód	Max. energia (keV) <sup>6</sup>
$^{210}_{82}\text{Pb}$	22,2 év	$\beta^-$	63
$^{210}_{83}\text{Bi}$	5 nap	$\beta^-$	1161
$^{210}_{84}\text{Po}$	138 nap	$\alpha$	5400
$^{208}_{80}\text{Pb}$	$\infty$	-	-

1.1. táblázat. A  $^{210}\text{Pb}$  bomlási sora és leányelemei.

### 1.4.3. Sugárzások abszorpciója

A céloom az volt, hogy bemutassam az  $\alpha$  és  $\beta$  részecskék közegben történő elnyelődését. Ehhez elsőként vékony aranyfüst fóliát helyeztem a sugárforrás elé, ami a várakozások szerint az alfa sugárzást elnyeli, de kellően vékony fólia esetén a béta sugárzást áttereszt. Sajnos a fólia mögött egyáltalán nem látszottak ködfonalak, így a szelektív elnyelést nem sikerült demonstrálni. Ezután egyszerűbben kezelhető vastagabb réz fóliát helyeztem el forrás előtt, amely láthatóan adott térszögben minden sugárzást elnyelt (lásd 1.11 ábra). Fontos megjegyezni, hogy az abszorpciót bemutató 1.11 ábrán lévő képek csak pillanatfelvételek, a sugárzások elnyelődésére vonatkozó kijelentéseim sokkal látványosabban megfigyelhetők videofelvételeken, illetve egy demonstráció során.



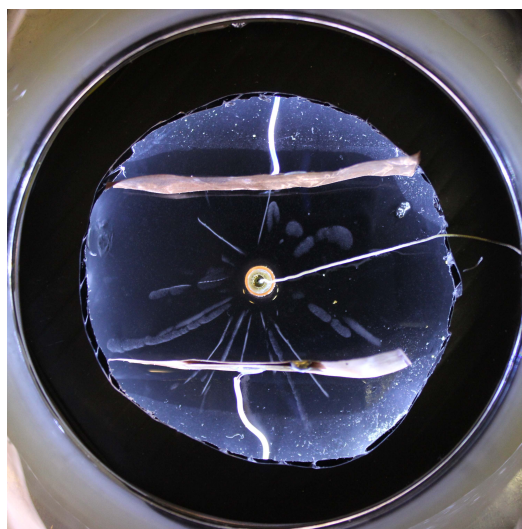
1.11. ábra. Balra a  $^{210}\text{Pb}$  izotóp keltette ködfonalak, jobbra pedig a sugárzás kis térszögben való árnyékolása látható, rézlemezzel.



#### 1.4.4. Sugárzások elektromos térrel való eltérítésének vizsgálata

A kísérlethez a ködkamra hűtött felülete fölé helyeztem el két vékony rézlapból álló elektródapárt, és egy *Delta ES 300-0.45*-ös nagyfeszültségű tápegységgel 250V-os feszültséget kapcsoltam a két elektróda közé. Az elektromos tér polaritása megfordítható, illetve a teljes elektromos tér is megszüntethető, lehetőséget teremtve ezzel a kontrollkísérletre. Könnyen belátható, hogy az alkalmazott geometria mellett jelentős eltérést csak akkor kapunk, ha a részecske kinetikus energiája összemérhető a  $q \cdot U$  energiával, ahol  $q$  a részecskék töltése,  $U$  pedig az elektródákra kapcsolt feszültség. Ismerve a  $^{210}\text{Pb}$  forrás által kibocsátott sugárzások kinetikus energiáját egyértelmű, hogy csak akkor várunk eltérést, ha a nagyenergiás részecskék kinetikus energiája már pár száz elektronvolt nagyságúra csökken.

A kísérletek szerint komoly eltérés mutatkozott. Kísérletileg cáfolható volt azonban, hogy az 1.12 ábrán látható eltéréseket az elektromos tér okozná.



1.12. ábra. A  $^{210}\text{Pb}$  forrásból származó részecskék látszólagos eltérése elektromos térben. Kimutathatóan nem az alkalmazott elektromos tér okozza az effektust.

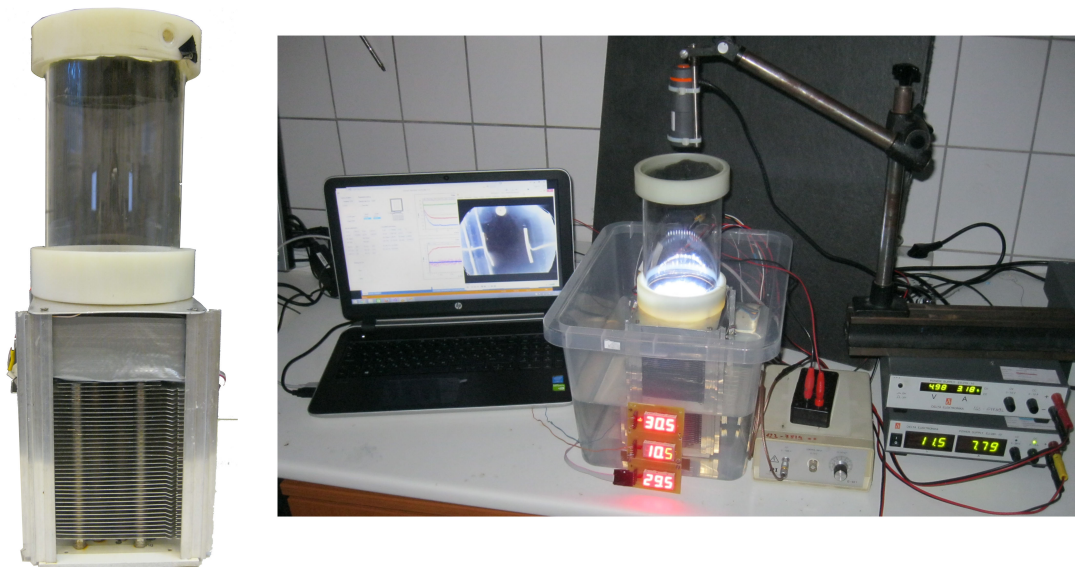
Az egyes részecsketípusok megkülönböztethetőek az 1.4.1 részben leírtak alapján, elsősorban vastagságuk szerint. Adott irányú elektromos tér jelenlétében megfigyeltem, hogy az azonos vastagságú részecskék pályája látszólag merre térül el. Ellentétes irányú elektromos térrel adott részecskére ellenkező irányú eltérést kellett volna tapasztalnom, azonban a kísérletek szerint azonos irányú eltérés mutatkozott. Továbbá némely esetben olyankor is tapasztaltam (látszólagos) eltérést, mikor nem is volt elektromos tér a kamrarészre kapcsolva.

A jelenség magyarázata valószínűleg a hűtött oldalon lévő hőmérsékletkülönbség okozta oldalirányú áramlás a túlhűtött rétegben. A hűtött felület nem terjed ki ugyanis a kör alakú kamrarész teljes felületére, így hőmérsékletkülönbség alakulhat ki, ami az alkoholgőz áramlásban nyilvánul meg. Feltételezésemet bizonyítandó, a hideg oldalra egy szigetelő gyűrűt helyeztem el, amely meggátolta az áramlást, és vizsgáltam a forrásból kilépő sugárzásokat. Ekkor csak egyenes trajektóriákat figyeltem meg, az elektromos tér jelenlététől függetlenül.

Kísérletileg tehát nem tudtam kimutatni elektromos tér okozta eltérést jelen elrendezésnél. Tervezem később a kamra rész szigetelővel történő befedését. Így csak közvetlenül a Peltier-elem felett alakul ki túlhűtött réteg, amivel várhatóan meg tudnám szüntetni áramlás okozta látszólagos eltéréseket.

## 1.5. A demonstrációs célú ködkamra bemutatása

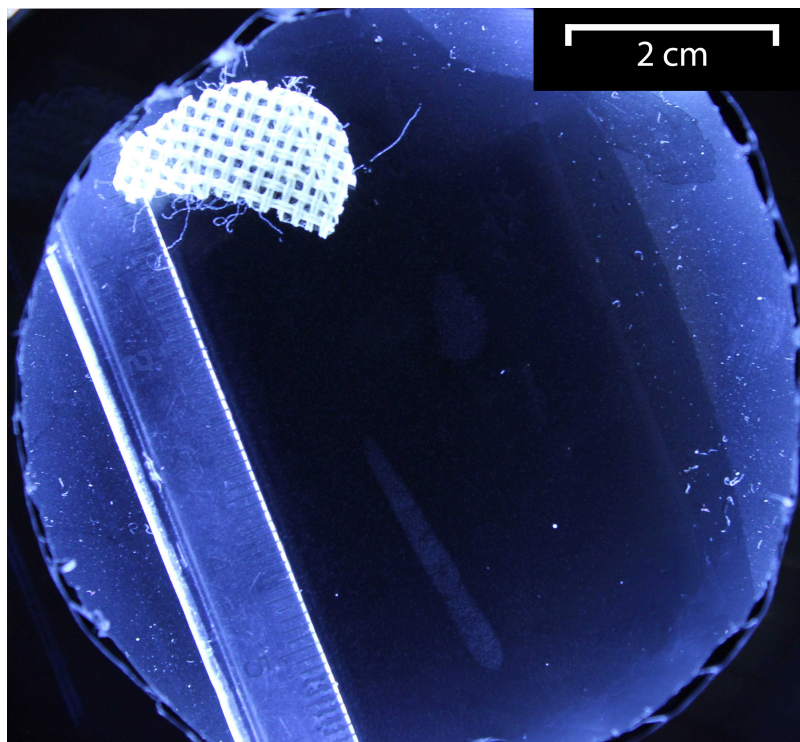
Az előadásom során elsőként beszélek a minket körülvevő természetes háttérsugárzásról, és annak forrásairól. Kitérek rá, hogy az ember által mesterségesen létrehozott radioaktív sugárzás milyen forrásokból származik, és hogy milyen elhanyagolhatóan kicsi hatást jelent ez a természetes háttérsugárzáshoz képest.



1.13. ábra. Balra a diffúziós ködkamra kamrarésze, jobbra a teljes demonstrációs mérési összeállítás látható.

Ezután rövid történeti összefoglalót mondok a radioaktív sugárzás legfontosabb felfedezéseiről, kiemelve a Nobel-díjjal díjazottakat. Külön kiemelem, hogy ködkamrával fedezték fel a 1932-ben a pozitront, illetve ködkamrában rögzített magátalakulás révén 1954-ben Szalay Sándor és Csikai Gyula közvetett bizonyítékot szolgáltatott a neutrínó létezésre [10].

A ködkamra működésével és felépítésével folytatom az előadásomat. A demonstrációhoz előkészített diffúziós ködkamra látható az 1.13 ábrán. A ködfonalak képződésének megértésére a repülőgépek kondenzcsíkjának képződését hozom fel analógiaként [2]. Ezután rátérek, hogy az általam megépített ködkamra milyen felépítésű, milyen speciális elemekkel bír. Külön részletezem a Peltier-elemmel történő hűtés megvalósítását és jellemzőit. Ezt követően ismertetem a kamrában kimutatható részecskéket, és azok jellegzetességeit, mint láthatóság, a keltett ködfonalak alakja, mérete, kölcsönhatás elektromos és mágneses térrel, stb.



1.14. ábra. Gázharisnya által keltett  $\alpha$  részecskenyom a ködkamrában.

A ködkamrába elsőnek a tóriumos gázharisnya mintát behelyezve elindítom a kamra hűtését. A kamrában a ködfonalak kialakulásáig a hűtés bekapcsolásától kezdve néhány percnél kell eltelnie. A közönség az USB-s mikroszkóp segítségével már a ködképződést és az alkoholgőz kondenzációját is jól megfigyelheti. Emellett a Peltier-elemeknél lévő

három hőmérő által mért hőmérséklet is folyamatosan megjelenítésre kerül a működés során, így teljes körűen nyomon követhető a hűtés folyamata.

Mikor a ködfonalak már kialakultak a hűtött felület felett (lásd 1.14 ábra), ismertetem az aktuálisan látható ködfonalakat. A kamrában lévő vonalzó, valamint a korábban részletezett ökölszabály segítségével becslést adok a megjelenő  $\alpha$  részecskék energiájára nézve. Azt is leszögezem, hogy miért csak becslés a kapott eredmény.

A gázharisnya után a tóriumos hegesztő pálcát helyezem be a kamrába. Amíg ismét kialakul a túlhűtött réteg, mesélek arról, hogy mire használták a gázharisnyát. A hegesztőpálcánál pedig elmondom, hogy ma is kereskedelmi forgalomban kapható, mindenfajta sugárvédelmi engedély nélkül beszerezhető sugárforrás, mely radioaktivitását a gázharisnyához hasonlóan tórium tartalmának köszönheti. Kifejtem továbbá, hogy a tórium a természetben is megtalálható, egyik természetes bomlási sor kiinduló eleme, és nagy felezési ideje miatt, valamint a pálcában lévő tórium kis koncentrációja miatt a hegesztőpálca, mint sugárforrás veszélytelen. A kamrában lévő ködfonalak a gázharisnyával egyező képet mutatnak, bizonyítva, hogy mindkettőben azonos elemről származnak a bomlások.

A radioaktivitásról a közhiedelemben elterjedt az a kép, miszerint a radioaktív források zölden fluoreszkálnak. UV lámpával megvilágítva pár urán tartalmú üvegyöngyöt megjegyzem, hogy annak zöld fluoreszcenciáját valóban a radioaktív urán tartalma okozza, persze alapvetően nem minden sugárforrás produkálja ezt a jelenséget. Egy ilyen uránüvegyöngyöt helyezek el a kamrában, és ismertetem, hogy a bomlási módja alapján milyen ködfonalakat várhatunk. A tóriumos hegesztőpálca és az uránüvegyöngy is kisebb  $\alpha$  aktivitást mutat a gázharisnyánál, melynek oka az önárnyékolás és persze a kis izotóp koncentráció. Az önárnyékolásról és annak kivédéséről is beszélek a nagy aktivitású  $\alpha$  sugárforrás készítésénél.

Legutolsó forrásként helyezem be a kamrába a  $^{210}\text{Pb}$ -es preparátumot. Bemutatom, hogy az előző forrásokkal szemben ez miért tekinthető kiváló sugárforrásnak: megfelelő geometriai kialakítása, a ködkamra szempontjából optimális aktivitása, mindhárom alapsugárzás fajta produkálása, valamint az önárnyékolás hiánya teszi egyedivé. Ismertetem a bomlási sorát, leányelemeit és azok bomlásait, bomlásállandóit, valamint a keletkező részecskék energiáit. Ezzel a forrással mutatom be az összes további kísérletet. Elsőként rátérek a sugárzások árnyékolására, az egyes részecskék anyagban történő abszorpciójára. Felhívom a figyelmet, hogy mennyire fontos terület ez nagy sugárdózist adó üzemeknél (pl.: atomreaktor primer köre, radioizotópos nyomjelzés, stb.), és mely részecsketípusok esetén jelent nehézséget a sugárzásvédelem kivitelezése. A ködkamrában lévő részecskék elnyelődésének demonstrálására egy vékony réz lemezt helyezek a sugárforrás elé. A le-

mez mögötti térészben nem jelennek a forrásból származó ködfonalak, mivel a rézlemez abszorbeálja ezeket.

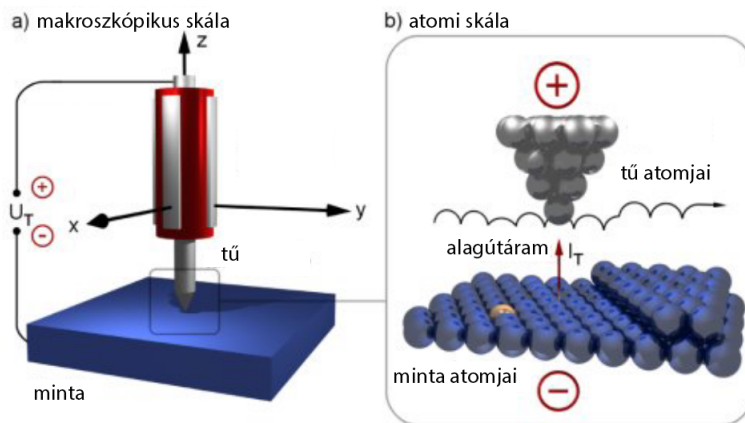
Az előadásomat azzal zárom, hogy kiveszem a kamrából a  $^{210}\text{Pb}$ -es preparátumot, de a hűtést még nem állítom le. Ekkor válik láthatóvá a háttérsugárzás, ugyanis a ködkamrában a forrás hiányának ellenére is képződnek ködfonalak. Természetesen ezek gyakorisága jóval kisebb, mint a korábban bemutatott sugárforrások esetében. Röviden bemutatom, hogy kozmikus sugárzás hatására milyen fizikai folyamatok játszódnak le a légkörben, és ennek következménye a  $\mu^\pm$  részecskék észlelése a ködkamrában [3].

## 2. fejezet

# Demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkóp

### 2.1. Bevezetés

Régóta tudjuk, hogy az anyag atomokból épül fel, de atomi felbontású mikroszkópos felvételt G. Binning és H. Rohrer pásztázó alagútmikroszkópjával sikerült először készíteni 1981-ben. Munkájukért 1986-ban Nobel-díjban részesítették őket.



2.1. ábra. A pásztázó alagútmikroszkóp elvi felépítése.

Az STM működése az alagút-effektuson alapszik. Tekintsük a 2.1 ábrán lévő elrendezést! Egy hegyes fém tűt  $d$  távolságra helyezve egy fém mintától, és a kontaktusok közé nem túl nagy  $V$  feszültséget kapcsolva az elektródák között folyó áram [11]:

$$I \sim V \cdot e^{-\sqrt{8m\Phi} \cdot \frac{d}{\hbar}} \quad (2.1)$$

ahol  $m$  az elektron tömege,  $\Phi$  a fémre jellemző kilépési munka. Vákuumban, a fémek tipikusan 4-5 eV-os kilépési munkájával számolva 1 Å-nyi változás a tű-minta távolságban 1 nagyságrend változást okoz az alagútáramban. Ennek a ténynek köszönhetően nem feltétlenül kell nagyon hegyes tűt kialakítani, ugyanis általában lesz egy atom, ami egy kicsit közelebb van a felülethez, mint a többi, így az áram nagy része ezen keresztül folyik.

Amennyiben a minta felett mozgatjuk a tűt - miközben folyamatosan mérjük az alagútáramot - akkor a felület topográfiáját is meg tudjuk határozni. Ehhez a minta síkjában  $(X, Y)$  történő pásztázás közben  $Z$  irányba mindig úgy emeljük fel vagy engedjük le a tűt, hogy az alagútáram konstans maradjon. A  $Z$  pozíció  $(X, Y)$ -függéséből a minta topográfiája akár atomi felbontással leolvasható. A tű pozicionálása piezoelektromos mozgatókkal történik, melyek akár szubatomi mozgásokra is képesek: a 2.1 ábrán látható elrendezésben a tűt a mintára merőlegesen ( $Z$  irány) és a minta síkjában ( $XY$  irány) mozgatjuk a három piezoelektromos mozgatóval.

A BME Fizika Tanszék Nanofizika laboratóriumában Magyarkuti András kutatási célokra készített egy saját fejlesztésű szobahőmérsékleti STM-AFM <sup>1</sup> rendszert [12]. Jómagam később kapcsolódtam ebbe a projektbe, az STM-AFM alacsony hőmérsékleti továbbfejlesztésébe. Az STM építés során szerzett tapasztalatok alapján felmerült az igény, hogy érdemes lenne egy, a lehetőségek szerint minél olcsóbb elemekből felépülő, könnyen szállítható, kifejezetten demonstrációs célú STM-et építeni.

A következő 2.2 fejezetben részletesen kifejtem, hogy az eszköz elkészítésénél milyen tervezési szempontokat vettem figyelembe, és végül milyen megoldásokkal éltem a demonstrációs STM megépítésénél. A 2.3 és 2.4 fejezetekben a mérésekhez készített mintákat, és az elkészült eszközzel bemutatható demonstrációs kísérleteket ismertetem.

## 2.2. A demonstrációs STM felépítése

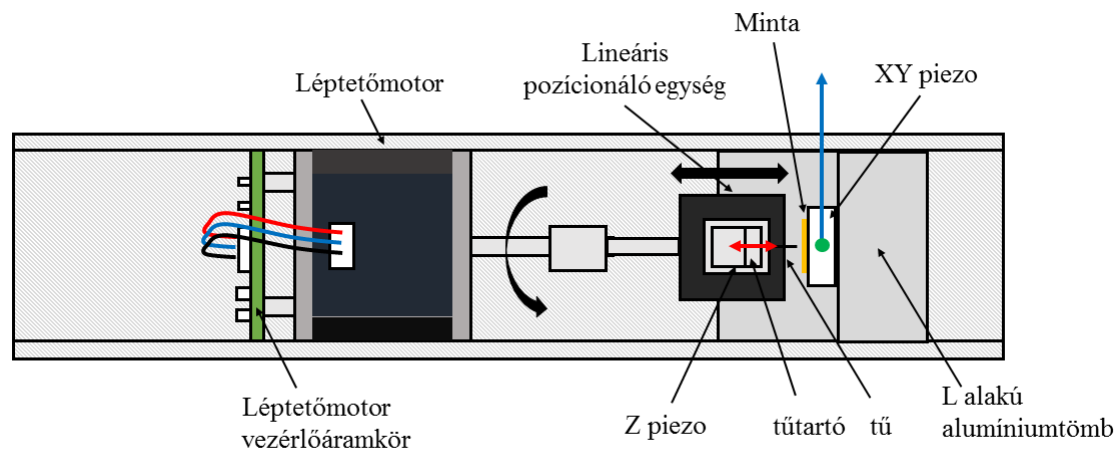
### 2.2.1. A mérőfej felépítése

A berendezés legfontosabb része a mérőfej. Az alapja egy U alakú alumínium sín, amelyen elhelyezésre került egy léptetőmotor és annak vezérlőáramköre, az  $XY$  irányú piezoelektromos mozgatókat is tartalmazó mintatartó, valamint a motor tengelyének forgását lineáris mozgássá átalakító lineáris pozícionáló, illetve az erre rögzített  $Z$  irányú piezoelektromos mozgató, melyen a tűtartó is található. A léptetőmotor külsejére lett rögzítve egy USB-s csatlakozású digitális mikroszkóp, melynek funkciójáról a 2.2.5 részben írok majd részletesen. Az alumínium sínen továbbá helyet kaptak a piezoelektromos moz-

---

<sup>1</sup>AFM = Atomic Force Microscope, magyarul atomerő mikroszkóp

gatók kivezetései, a léptetőmotor tápellátását és felprogramozását biztosító csatlakozók, valamint az alagútáram és a mérőfeszültség BNC csatlakozói. A megvalósított mérőfej sematikus felépítését a 2.2 ábra mutatja, a fontosabb részegységek megnevezésével. A finom mozgatót megvalósító részokról készült fényképek a 2.3 ábrán láthatóak.



2.2. ábra. A kialakított demonstrációs célú STM mérőfej szerkezeti egységei. A közelítést segítő USB-s mikroszkóp a jobb láthatóság érdekében nincs jelölve a rajzon.

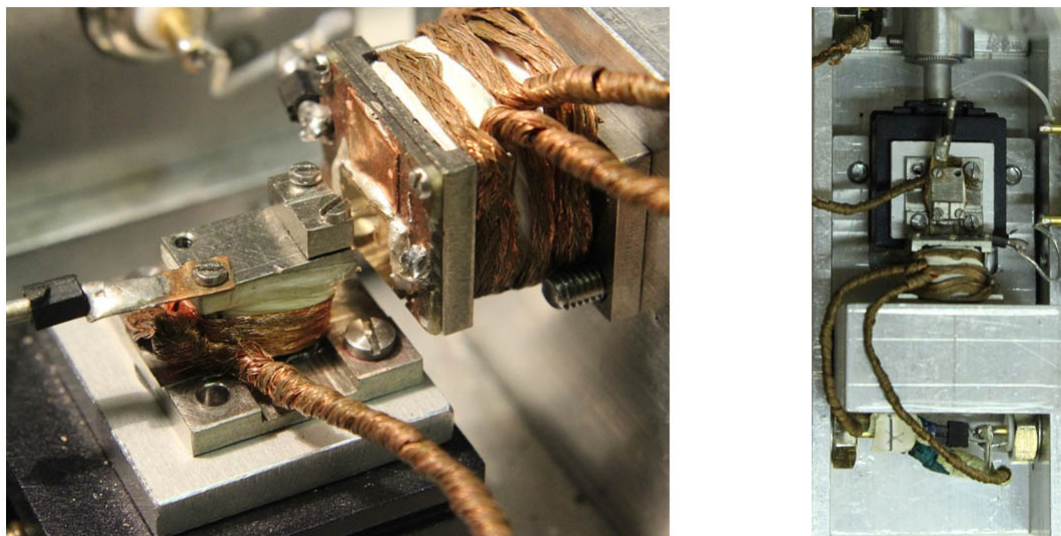
A léptető motor olyan speciális motortípus, amely digitális jelekkel vezérelhető és a motor tengelye csak diszkrét pozíciókra állítható be. Jellemzően az ilyen motorokat pozicionáláshoz, illetve szabályozásokhoz alkalmazzák. A demonstrációs STM-ben lévő léptetőmotor *TRINAMIC - PD3-013-42* típusú, vezérlőáramkörrel ellátott léptetőmotor, mely négy digitális jelvezeték segítségével vezérelhető. Az egyik vonalon a motor ki- és bekapcsolható, a másik vonalon a motor forgásiránya állítható be, a harmadik vezeték pedig egy rövid pulzust küldve a motor egy lépést tesz, azaz körülbelül 0,1 fokkal fordul el, a negyedik vezeték pedig a digitális földelést adja. A léptető motor felel a tű nagy léptékű, azaz  $1 \mu\text{m}$  feletti elmozdulásáért, míg a felülethez közel már a *Z* irányú piezoelektromos mozgató segítségével szabályozható a tű-minta távolság.

A mintatartó tervezésénél fontos szempont volt a különböző anyagi minőségű elemek használatából eredő hőtágulások kivédése, ezért a szerkezeti elemek egységesen alumíniumból készültek. A mechanikai rezgések kivédése érdekében egy tömör alumíniumtömbre kerültek rögzítésre a finom mozgatókat megvalósító egységek (2.3 ábra).

Az elektromos árnyékolás mind a piezoelektromos mozgatók, mind az alagútáram mérése esetében kiemelt fontosságú volt a tervezésnél. Az alagútáram esetében a minta és a közvetlenül az áramerősítőhöz csatlakozó BNC kivezetés között a lehető legrövidebb vezetékkel alkalmaztam. A piezo jelvezetékek esetében rézharisnyával gondosan árnyékol-



tam minden kábelt, és magát a piezoelektromos mozgatót is. Enélkül a piezo-ra adott nagyfeszültségű vezérlőjel „áthallatszik” az árammérésbe.



2.3. ábra. A demonstrációs STM mérőfejének részletei.

Fontos megjegyezni, hogy a demonstrációs STM-ben alkalmazott piezoelektromos mozgatóegységeket a *PI* cégtől vásárolt piezo kerámiákból építettem, tervezett geometriájú titán darabok segítségével. A kerámiákat *stycast* ragasztóval rögzítettem a titánda-rabokhoz, majd a jó elektromos árnyékolás elérése végett rézharisnyával tekertem körbe a piezo kerámiákat. Így egyrészt kevesebbe kerültek a pozicionálók, másrészt saját elképzelésünknek megfelelően alakíthattuk ki a titán befoglaló formákat. Az így kapott mozgatók kompatibilisek a Nanokontaktusok laboratóriumában lévő többi STM berendezéssel, valamint az ezekhez készített mintákkal is. Szeretném megjegyezni, hogy nagy stabilitású STM rendszerekben a mechanikai elemeket előszeretettel alakítják ki alacsony, a piezo kerámiákhoz hasonló hőtágulási titánból. Az alumínium hőtágulási együtthatója a titánénak mintegy két és félszerese, azonban a demonstrációs célú mintatartót a nehéz megmunkálhatóság és a drága anyagár miatt nem kívántuk titánból készíteni.

Az elkészített piezoelektromos mozgatók legfontosabb paramétereit a 2.1 táblázat tartalmazza [13]. Látható az adatok alapján, hogy ezek a piezo kerámiák bipolárisak és igen nagy feszültséget bírnak. Nem utolsósorban a kerámiák kis kapacitásértéke gyors vezérlést tesz lehetővé.

@ 300 K	Max. elmozdulás [ $\mu\text{m}$ ]	Kapacitás [nF]	Feszültség [V]	Érzékenység [ $\frac{\text{\AA}}{\text{V}}$ ]
P-142.03, X	3	17	$\pm 250$	60
P-142.03, Y	3	17	$\pm 250$	60
P-121.03, Z	3	4,2	$\pm 250$	60

2.1. táblázat. A demonstrációs STM-ben alkalmazott piezo mozgatók paramétereit.

Itt szeretném megjegyezni, hogy a 2.1 táblázattal ellentétben a kész műszerben sokkal kisebb tartományban képesek a piezoelektromos mozgatók mozogni. Ennek oka alapvetően a névlegesnél kisebb feszültségtartomány alkalmazása, mely az  $XYZ$  mozgatók esetén egységesen  $-20$ - $+130\text{V}$ . Ennek részleteiről a 2.2.3 részben írok.

### 2.2.2. Áramerősítő készítése

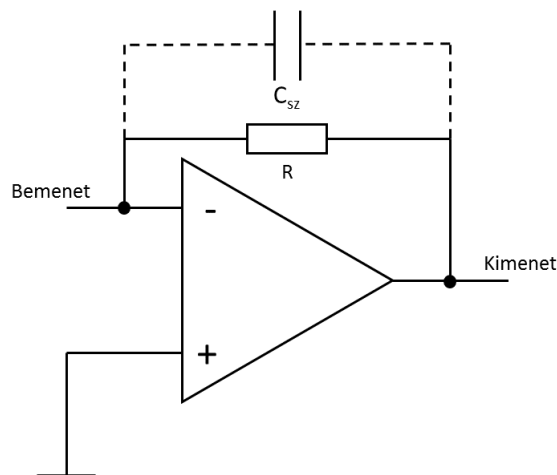
Az alagútáram méréséhez elengedhetetlen egy kiváló paraméterekkel bíró erősítő alkalmazása. Az erősítővel szemben támasztott elvárások a következők:

- Nagy erősítésű legyen, nagyságrendileg  $10^9$  értékű. Ekkor  $1\text{ nA}$  áram  $1\text{V}$ -os feszültségnek felel meg.
- Legyen gyors felfutású, vagyis megfelelően nagy sáv szélességű. Ha ez nem teljesül, akkor a szabályozás lassú lesz.
- Rendelkezzen lehetőleg minél jobb jel-zaj viszonyal.

Sajnos a fenti pontok közül a nagy erősítés és sáv szélesség nehezen összeegyeztethető. A műveleti erősítővel felépített erősítőkapcsolást sematikusan a 2.4 ábra mutatja, szemléltetve hogy a visszacsatoló  $R$  ellenállással párhuzamosan egy  $C_{sz}$  szórt kapacitás is megjelenik. Ismeretes, hogy egy  $RC$  szűrő  $\tau$  időállandóját  $R \cdot C$  szorzatból kapjuk meg, amelyben  $R$  az eredő ellenállás,  $C$  pedig az eredő kapacitás értéke. Mivel vezetékek és egyéb szórt kapacitások mindig jelen vannak, ezért a körben lévő kapacitás értéke nem redukálható tetszőlegesen kis értékűre. Amennyiben  $R = 1\text{G}\Omega$ , és  $f = 1\text{ kHz}$ -es sáv szélességet kívánunk elérni, úgy  $C$  értékére  $1\text{ pF}$  adódik. Ennél lényegesen kisebb szórt kapacitásértéket, és így  $10^9$ -es áramerősítésnél  $1\text{ kHz}$ -nél lényegesen nagyobb sáv szélességet nehéz elérni.

Bár a Fizika Tanszék nanofizika laboratóriumában több *FEMTO DLPCA-200*-as állítható erősítésű áramerősítő is található, mégis úgy döntöttem, hogy saját áramerősítőt építetek az eszközhöz. A saját erősítő használatával felszabadítom a *FEMTO* erősítőket,

amelyek egyébként általában folyamatosan használatban vannak, és több olyan extra tulajdonsággal is rendelkeznek, amelyeket nem használnék ki a demonstrációs STM-nél. Megjegyezném továbbá, hogy az általam megépített erősítő költsége nagyságrendekkel kevesebb, mint a gyári *FEMTO* erősítő esetében.



2.4. ábra. Erősítőkapsolás műveleti erősítővel. A  $C_{sz}$  az erősítő kör szórt kapacitásértékét jelöli.

Az erősítő kapcsolási rajza a 2.5 ábra bal szélén látható. A kapcsolást a Basel-i egyetemen tervezték, a kapcsolat megvalósításához szükséges nyáklapot és áramkört saját kezűleg készítettem el.

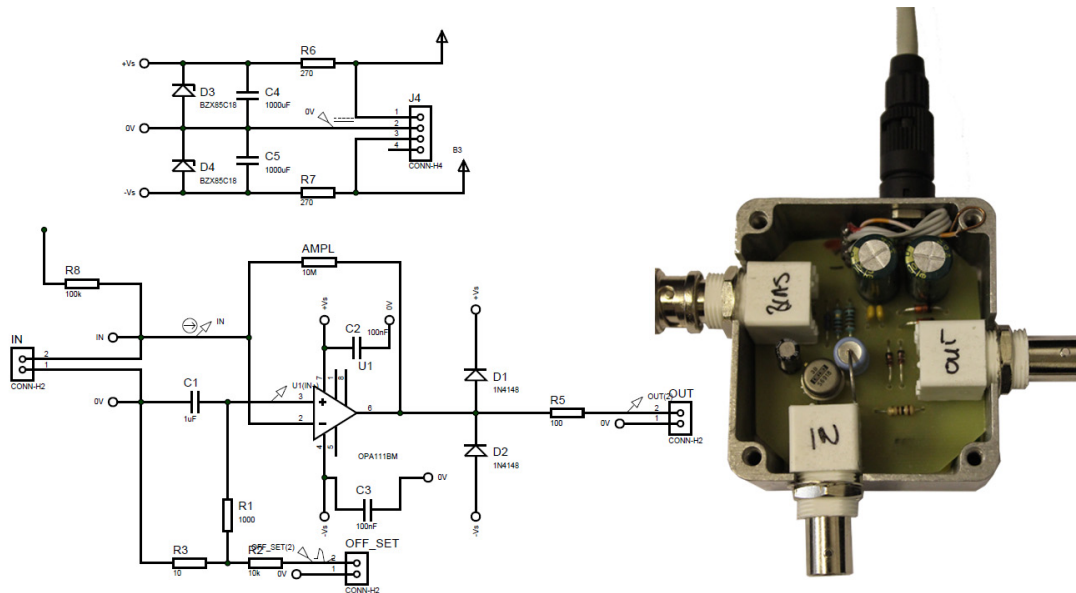
Az erősítő jel-zaj viszonyát ilyen nagy erősítésnél drasztikusan lerontja a bemenetre kerülő bármilyen nemű elektronikus zaj, illetve a tápfeszültség ingadozásai. Ezért komoly elektronikus árnyékolás, illetve tápszűrés szükséges az erősítőnek. Az erősítő áramkör ezért egy külön zárt és árnyékolt fémdobozban helyezkedik el, a tápegység része pedig egy különálló, árnyékolt fémdobozból van az erősítőhöz vezetve.

Az erősítő saját zaját a zajspektrummal jellemezhetjük. Egy  $f_0$  frekvencia körüli  $\Delta f$  sáv szélességű frekvenciatartományban az áram szórásnégyzete [14]:

$$\langle \Delta I(t|f_0, \Delta f)^2 \rangle = S_I(f_0) \cdot \Delta f, \quad (2.2)$$

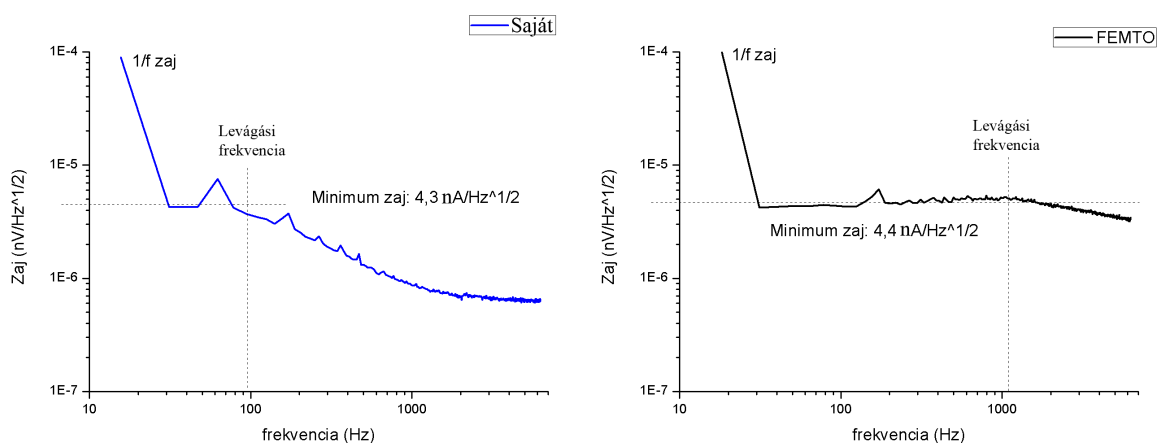
ahol  $S(f_0)$  a zaj spektrális sűrűsége. A mérnöki gyakorlatban a zajt gyakran az  $S$  spektrális sűrűség négyzetgyökével jellemzik, aminek a mértékegysége  $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ .

Egy *SRS770* típusú spektrumanalizátorral az áramerősítők kimeneti feszültségzaját mértem, úgy hogy a bemenetet leárnyékoltam, de semmilyen jelet nem csatlakoztattam



2.5. ábra. Balra az áramerősítőként használt,  $10^9$ -es erősítésű áramkör kapcsolása, jobbra pedig a kapcsolás alapján megépített erősítő látható, felnyitott fém házzal.

rá. A kimeneti feszültségzajt az erősítés értékével leosztva kapom meg az erősítő bemeneti áramzaját, azaz külső jel csatlakoztatása nélkül is úgy tűnik, mintha a bemeneti áram ennyire fluktuálna. Alapvetően a bemeneti zaj határozza meg az erősítővel mérhető legkisebb áramértéket.



2.6. ábra. Balra a saját készítésű, jobbra a *FEMTO* áramerősítő zajspektruma.

A 2.5 ábrán szemléltetett áramerősítő kapcsolásban a visszacsatoló ellenállás termikus zaja limitálja az elérhető minimális bemeneti zajt:  $10^9$ -es erősítésnél szobahőmérsékleten

$\approx 4 \frac{fA}{\sqrt{Hz}}$ -nél kisebb bemeneti zaj nem érhető el [14]. A 2.6 ábrán bemutatott mérések alapján mindkét erősítő megközelíti a minimális, termikus zajszintet, azaz jel-zaj viszony szempontjából a saját készítésű áramerősítő a *FEMTO* áramerősítőhöz hasonlóan teljesít. A két erősítő közötti fontos különbség a sávszélességben jelentkezik, ami szintén könnyen leolvasható a zajspektrumokból. Míg a *FEMTO* erősítő sávszélessége  $\approx 1$  kHz, addig a saját készítésű erősítőé csak  $\approx 100$  Hz. Ebből következően az utóbbi áramerősítő alkalmas ugyan az STM-ben való használatra, viszont csak lassabb szabályzó paraméterek mellett használható.

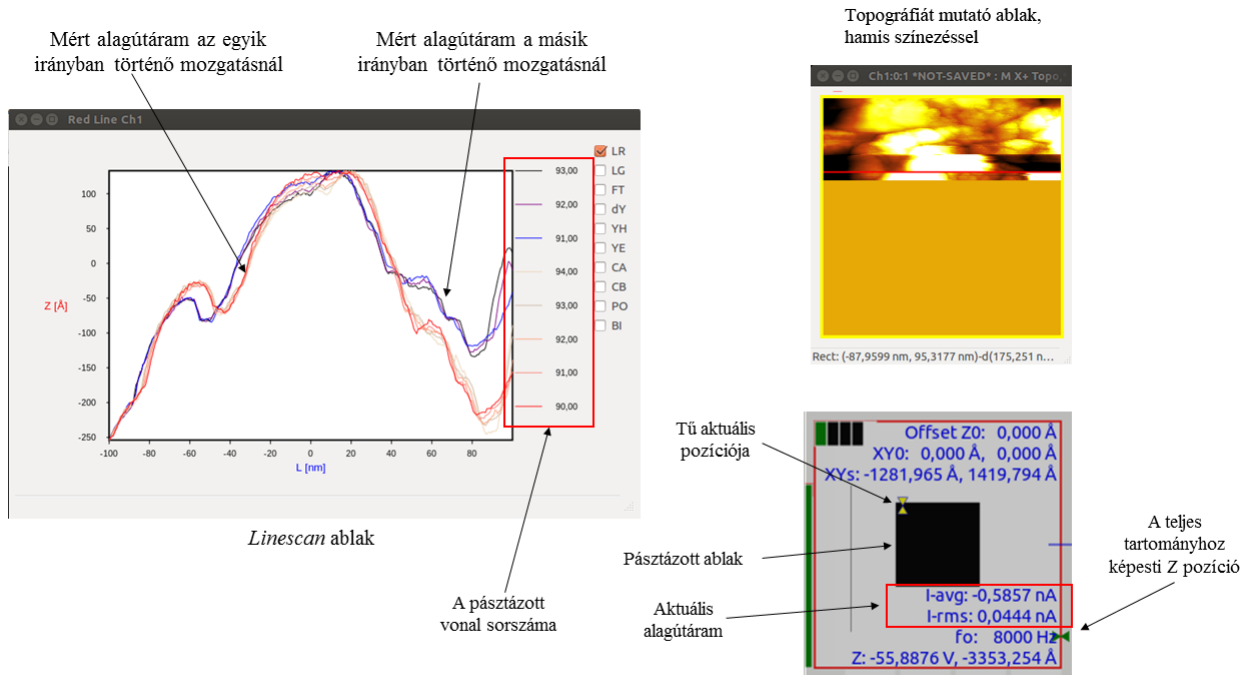
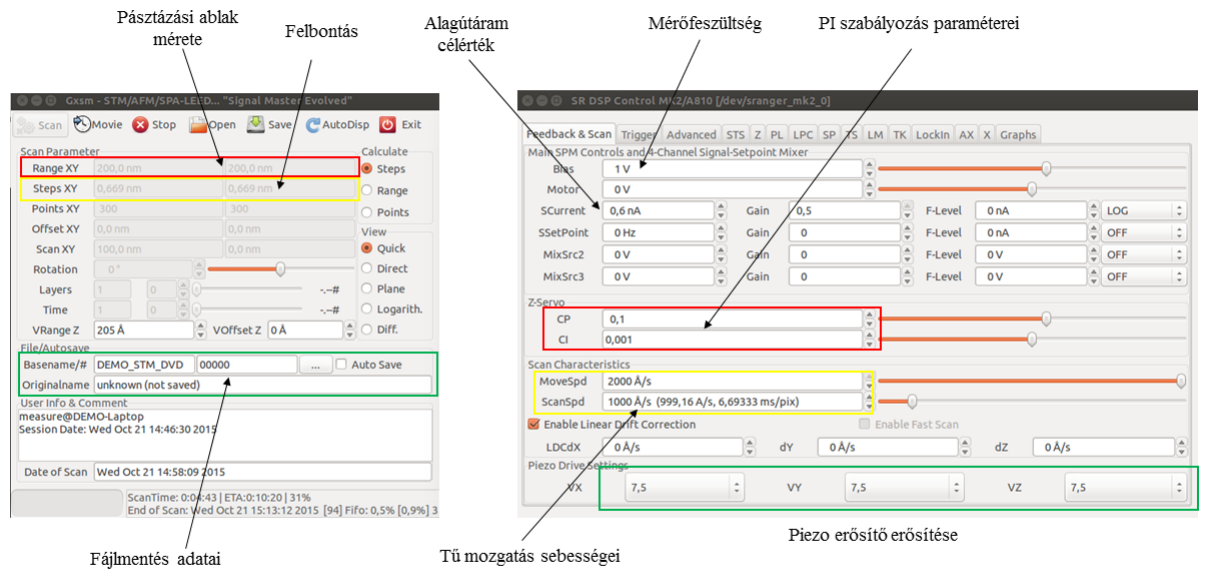
### 2.2.3. A demonstrációs STM vezérlése

A demonstrációs STM működtetéséhez elengedhetetlenül szükséges egy komplex vezérlő és szabályzó rendszer. Ennek a legfontosabb feladatai közé tartozik az alagútáram méréséből a tű pozíciójának szabályozása, a mért alagútáram rögzítése és megjelenítése, a pásztázás során a piezo-feszültségek változtatása és minden egyéb funkció, amely lehetővé teszi az STM tényleges működtetését.

A korábban említett, Magyarokuti András által fejlesztett szobahőmérsékleti STM-AFM rendszer vezérlését egy vásárolt *SoftdB MK2-A810* típusú SPM vezérlőáramkör valósítja meg [12]. Ezen hardver nagy előnye, hogy kompatibilis a GXSM nevű nyílt forráskódú SPM vezérlő szoftverrel. A GXSM szoftver (Gnome X Scanning Microscopy) LINUX környezetre írt, bármilyen pásztázó szondás mikroszkóphoz használható vezérlő, szabályzó és adatfeldolgozó a programcsomag, melynek elemei a felhasználó által módosíthatóak [15]. Ez széleskörű használhatóságot és speciális mérések véghezvitelét teszi lehetővé, ezért esett erre a választásunk. A szoftver legfontosabb funkcióit a 2.7 ábrán foglaltam össze, az egyes ablakok funkcióinak jelölésével.

Mivel egy demonstrációs eszköz elkészítése volt a célom, ezért a berendezések, vezérlőegységek kis mérete is létfontosságú volt a tervezésnél. Ezért döntöttünk úgy, hogy a külső fémház nélküli „csupasz” *SoftdB MK2-A810* hardvert rendeljük meg, és saját tervek alapján készítünk hozzá fémházat. Az *MK2-A810* egység összesen 8 analóg bemenetként vagy kimenetként konfigurálható adatvonallal rendelkezik, melyek egyenként  $\pm 10$ V-os tartományban, maximum 150 kHz-es mintavételezéssel bírnak. Emellett 16 szabadon konfigurálható digitális bemenet/kimenet, valamint 2 db 16 bites számláló is rendelkezésre áll [16]. Az áramkör minden csatornájára vonatkozóan nagyon alacsony zajszinttel és nagyfokú DC stabilitással bír, melyek szintén elengedhetetlenek az STM működtetéséhez.

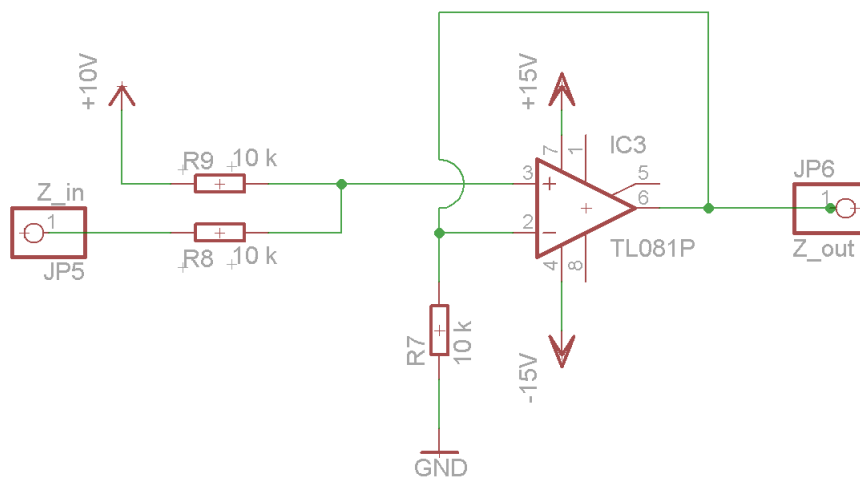
A GXSM képes bármely bemenetként konfigurált csatornáját megjeleníteni. Pász-



2.7. ábra. A GXSM program kezelőfelülete és a legfontosabb funkciói.

tázásnál a topográfiát és alagútáramot szokás megjeleníteni, oda- és visszirányú pásztázásra. Amennyiben az oda- és visszafelé haladó tű által felvett kép jó közelítéssel megegyezik, akkor a képképzésünk, amelyet elsősorban a tű geometriája határoz meg, megfelelő.

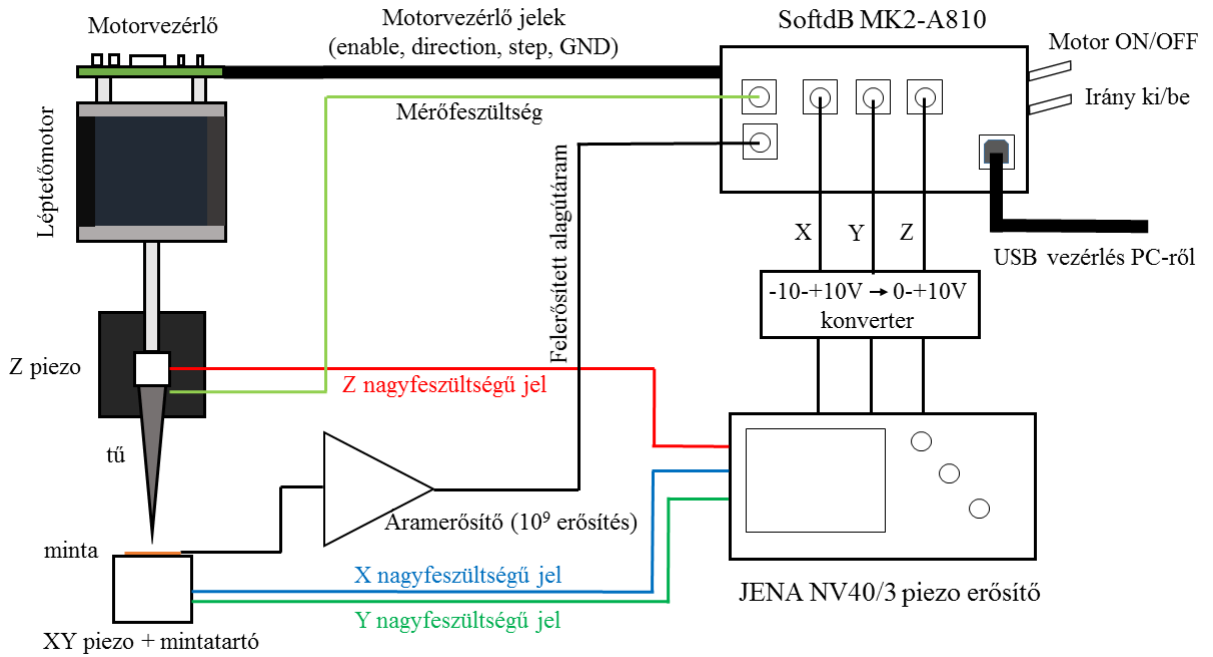
A demonstrációs STM-nél a *Piezo JENA system NV40/3*-as erősítőjét alkalmaztam. Ez egy kisméretű, 3 csatornás, piezoelektromos mozgatóhoz készített erősítő, amelynek kimenetei  $-20$ - $+130$ V-os tartományban változhatnak. A bemeneteire  $0$ - $+10$ V-ot kapcsolva szabályozható a kimeneti feszültség. Mivel a *SoftdB MK2-A810 XYZ* piezoelektromos mozgatóra kapcsolt kimenetei  $-10$ - $+10$ V között változhatnak, szükséges egy szintkonverziót megvalósító erősítő beiktatása. Erre a célra a 2.8 ábrán lévő kapcsolást terveztem és építettem meg. A teljes STM rendszer blokkdiagramját a 2.9 ábra mutatja be.



2.8. ábra. Az általam tervezett  $-10$ - $+10$  V  $\rightarrow$   $0$ - $+10$ V konverziót megvalósító erősítő áramkör kapcsolási rajza, egyetlen csatornára.

Az STM pásztázás lényege, hogy a  $Z$  piezo-ra adott feszültség változtatásával olyan módon szabályozzuk a tű-minta távolságot, hogy az elektródák között átfolyó alagútáram időben állandó legyen. Pásztázásnál a felület topográfiáját a  $Z$  piezoelektromos mozgatóra adott feszültség helyfüggéséből nyerjük.

Természetesen az alagútáram szabályozásához komoly szabályozókört kell alkalmazni. A GXSM szoftver úgynevezett PI szabályozást tesz lehetővé, mely szabályozástechnikában igen elterjedt módszer. Lényege, hogy megadunk egy általunk választott  $I_0$  alagútáram célértéket (*setpoint*), majd képezzük az  $e(t) = I_0 - I(t)$  hibajelet. A  $Z$  piezo-ra kapcsolt feszültség deriváltja ekkor az alábbi alakban írható le:



2.9. ábra. A demonstrációs STM funkcionális egységeinek blokkdiagramja.

$$\dot{z}(t) = C_p \cdot e(t) + C_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (2.3)$$

ahol  $C_p$  a proporcinális,  $C_i$  pedig az integrális, dimenziótlan együtthatók. Ezek határozzák meg a PI szabályozás  $\tau_{PI}$  időállandóját:

$$\tau_{PI} = \frac{C_p}{C_i} \quad (2.4)$$

Minél kisebb az időállandó, annál gyorsabb a szabályozás. A GXSM a szokásostól eltérő egységekben használja a vezérlőparamétereket, így a vezérlés időállandója

$$\tau_{PI} = \frac{C_p}{75000 \cdot C_i} \quad (2.5)$$

képlettel számolható. A méréseknél tipikusan  $C_p = 0,1$  és  $C_i = 0,001$  értékeket szoktunk beállítani, bár ez függhet a kísérleti részletektől, főleg instabil lengések esetén.

## 2.2.4. Rezgésmentesítés

A rezgésmentesítés nagyon fontos része az STM-nek. E nélkül gyakorlatilag nem lehetséges a fémfelület pásztázása, hiszen a környezetből jövő mechanikai rezgések teljesen elnyomnák a mért jelet, rosszabb esetben pedig a tű bele is nyomódhat a mintába. Egy



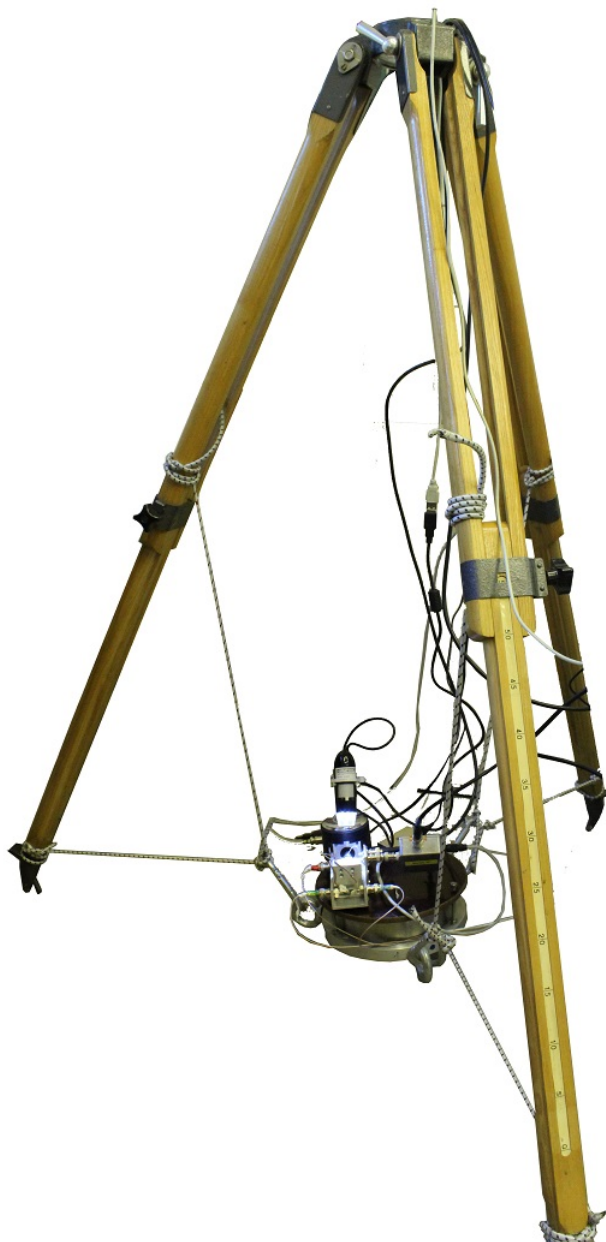
profi rezgésmentesítő asztal igen drága és nagy tömegű. Ilyen például a Fizika Tanszék Nanokontaktusok laboratóriumában használt **minus K 350BM-1** jelzésű rezgésmentesítő asztal, melynek tetején egy 100 kg-os márványtömb foglal helyet.

A rezgésmentesítő alapvető célja, hogy csillapítsa a kompakt kialakítású mintatartó belső rezgéseit, melyek magasabb frekvenciákon jelentkeznek (kb. néhány kHz-es nagyságrendben). Ezt legjobban egy minél alacsonyabb rezonanciafrekvenciájú, nem túl erősen csillapított felfüggesztő rendszerrel lehet elérni. Könnyen kivitelezhető konstrukció egy állvány, melyről gumikötelekkel rögzítve lóg le egy nagy tömegű súly. A gumikötél nyúlás közben energiát disszipál, így valósulhat meg a megfelelő csillapítás. A nagy súly pedig csillapítórendszer alacsony rezonanciafrekvenciájához szükséges. Túl nagy csillapítású rezgésmentesítő a rendszer belső rezgéseinek frekvenciáján több zajt eresztene át, ezért ez kerülendő.

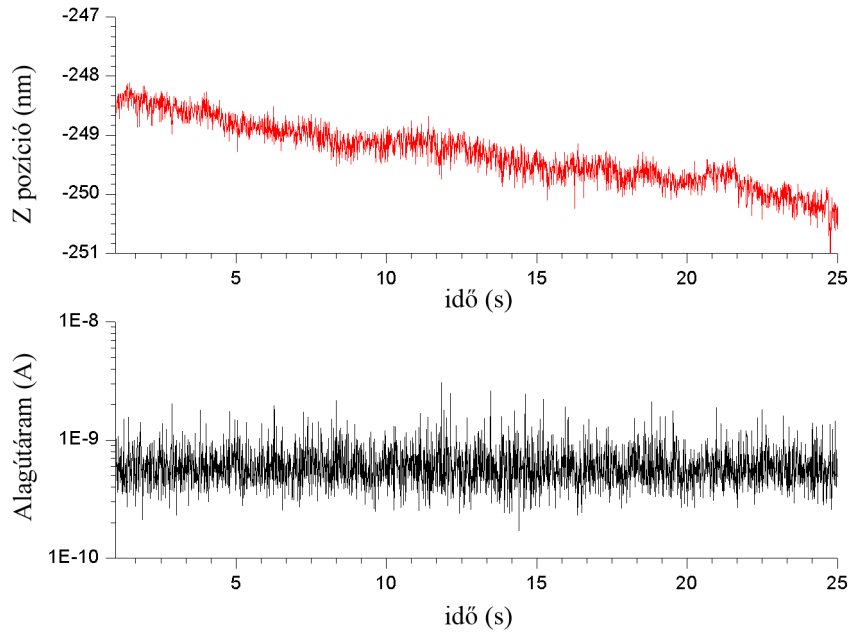
A kialakított rezgésmentesítő látható a 2.10 ábrán. Ennek alapja egy robusztus kameraállvány alsó része: tripod kialakítású, egyenként állítható szögű és magasságú lábakkal. A gumikötelekre egy 10 kg-os acéltömb nehezék került, ezen foglal helyet a mintatartó. A felső kötelek megfelelően csillapítják a függőleges mozgást, az alsó kötelek pedig a vízszintes mozgás csillapításáért felelnek.

Az elkészített rezgésmentesítő stabilitásának minősítésénél alkalmazott módszereket az alábbi két bekezdésben írom le. Miután a túvel megközelítettem a mintát, úgy hogy mérhető nagyságú alagútáramot kaptam (0,5-1 nA) a PI szabályozó kört kihasználva mértem a  $Z$  piezo-ra adott feszültség időfüggését. Amennyiben sem a hőtágulások, sem a mechanikai rezgések nincsenek hatással a rendszerre, úgy a mért feszültségjelem konstans lenne. Bármilyen gerjesztés hatására a tú-minta távolság megváltozik, és a szabályozókör ezt a feszültség megváltoztatásával igyekszik kompenzálni. Így a  $Z$  irányú piezo-ra adott feszültségjel információval szolgál a különböző gerjesztések, illetve hőmérséklet ingadozások által keltett elmozdulásokról. Elsőként egy egyszerű, gerjesztés nélküli stabilitás vizsgálatot kiviteleztem, melyet a 2.11 ábrán mutatok be.

A rezgésmentesítő állvány rezgésmentesítése annál jobb, minél kevésbé változik a tú pozíciója, illetve ezzel együtt az alagútáram időben. A fenti mérésben az alagútáram szórása 0,03 nA, a tú pozíciójáé pedig 0,5 nm (5 Å) volt. A tú pozíciójának lassú változását nagymértékben a hőmérsékleti *drift* okozza. A hőmérsékleti *drift* kivédése hőszigeteléssel megoldható lenne, ezzel viszont megszűnne a mérőfej közvetlen megfigyelhetősége, amely rontaná a demonstrálhatóságot. Amennyiben a hőmérsékletváltozás nem túl nagy és lassú ütemű, akkor ez nem jelent komoly problémát az STM képalkotását illetően. A tapasztalataim szerint zárt térben ez jó közelítéssel mindig teljesül (pl.: egy tanteremben).



2.10. ábra. A demonstrációs STM részére kialakított rezgésmentesítő, rajta az STM mérőfejjel.



2.11. ábra. A megvalósított rezgésmentesítő állvány stabilitásának vizsgálata, gerjesztés nélkül. Az alagútáram beállított célértéke 0,6 nA volt.

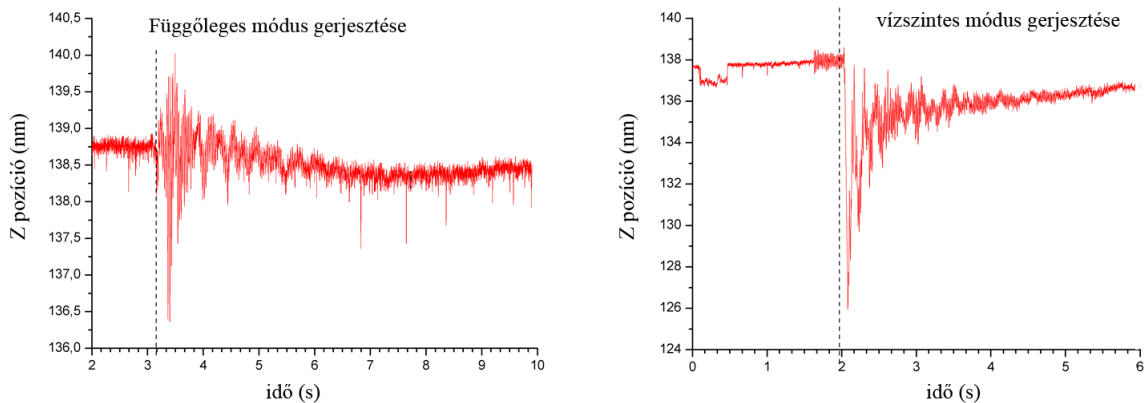
A stabilitásvizsgálatnál érdemes a mechanikus gerjesztésekre adott választ is megvizsgálni. Kézzel történő apró lökésekkel gerjesztettem a rezgésmentesítőt, és vizsgáltam a kialakuló vízszintes és függőleges rezgési módusok lecsengését, az előbbieken ismertetett méréshez hasonlóan. Ezen méréseimet a 2.12 ábrán mutatom be.

Jól látszik, hogy mindkét gerjesztés hatására csillapított harmonikus rezgőmozgásba kezd a rendszer, és néhány másodperc alatt a rezgés megszűnik.

A bemutatott stabilitásmérések alapján következtethetünk arra, hogy a rezgésmentesítő asztal megfelelő izolációt nyújt az elkészült demonstrációs STM számára a környezeti gerjesztésekkel szemben.

### 2.2.5. Közelítés és monitorozása USB mikroszkóppal

Szintén fontos fejlesztése volt a rendszernek az USB-s mikroszkóppal való felszerelés. Korábban nagyon sok időt vett igénybe (alkalmanként akár 10 perc!), hogy a tűt megfelelő óvatossággal közelítsem a mintához, megelőzve annak belenyomódását a mintába. Ez különösen problémás, figyelembe véve, hogy egy tipikus demonstrációs bemutatónál 20-30 perc alatt kell prezentálni a fontos és érdekes jelenségeket a hallgatóságnak. A nehézséget az okozta, hogy nehéz volt szabad szemmel megbecsülni a minta és tű közötti távolságot. Ennek a kiküszöbölésére született az a megoldás, hogy *in situ* monitorozom a minta-tű



2.12. ábra. A megvalósított rezgésmentesítő állvány stabilitásának vizsgálata, kézzel történő apró lökésekkel gerjesztve.

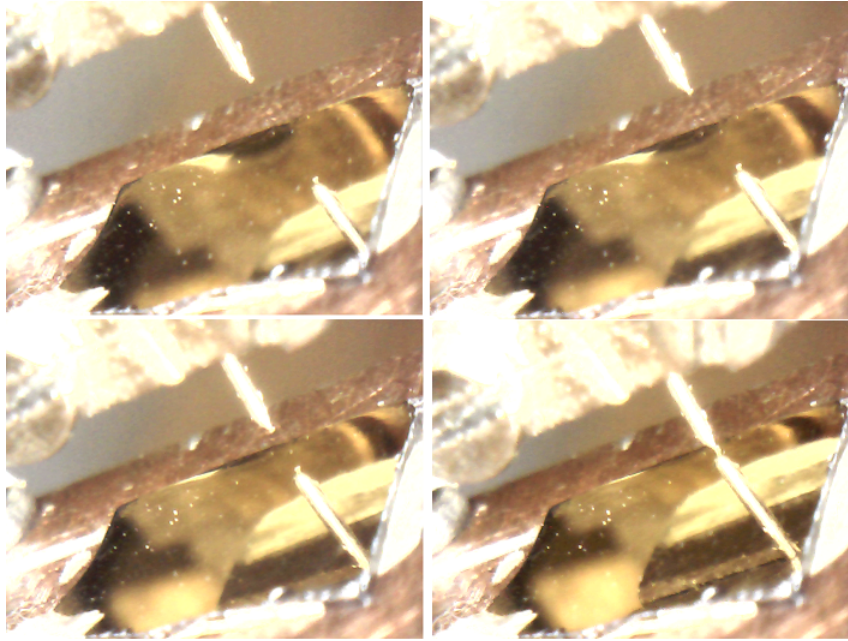
távolságot a mintatartóra rögzített mikroszkóp segítségével. Ehhez egy  $100\times$ -os nagyítású USB csatlakozású kompakt, digitális mikroszkópot használok, amit a léptetőmotor fölé, közvetlenül a mérőfejre rögzítettem, és PC-n keresztül *stream* üzemmódban élő képet kaptam a tű közelítéséről. A folyamatról néhány pillanatfelvétel látható a 2.13 ábrán.

Ezzel a módszerrel már olyannyira közel lehet vinni a tűt a mintához manuálisan, hogy a közelítés nagyon kis lépésszámnál is legfeljebb fél perc alatt lezajlik. Nem utolsósorban a közelítés videón való nyomon követése kifejezetten látványossá és érthetővé teszi a közönségnek a bemutató során az STM működését.

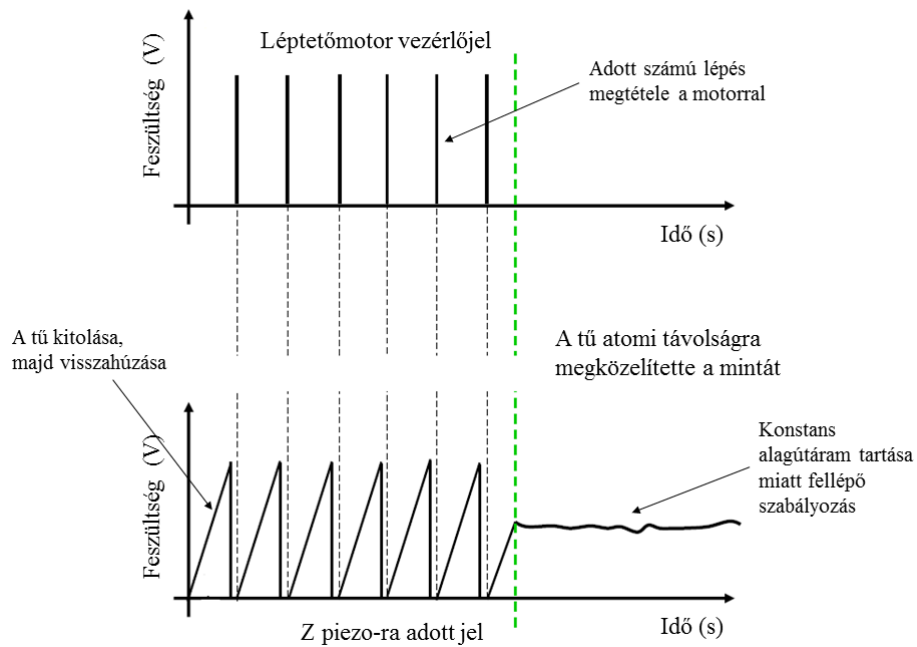
A közelítés tehát az alábbi lépésekből áll:

1. Manuálisan megközelítem a mintát, nagyjából  $1-10\ \mu\text{m}$  távolságra.
2. A *GXSM* automatikus közelítésével atomi távolságra közelítem meg a mintát.

A manuális megközelítésnél egyszerűen csak adott lépésszámot beállítva (tipikusan  $100-1000$  db lépés), kizárólag a léptetőmotort használva változtatom a tű pozícióját. Az automatikus közelítésnél már a  $Z$  irányú piezo-val is mozgatom a tűt. Ezen módszer lényege, hogy kis lépésszámmal (1-2 db!) a *GXSM* elvégzi a léptetőmotoros mozgatót, majd a piezo-val tolja ki a tűt és közben monitorozza, hogy mérhető-e a beállított alagútáram célértéke. Ha nincs alagútáram, akkor piezo-val visszahúzza a tűt, és a folyamat kezdődik előlről. Amennyiben elérte a tű a mintát, a PI szabályozó biztosítja a konstans alagútáramot. Az előbb leírtakat szemlélteti a 2.14 ábra.



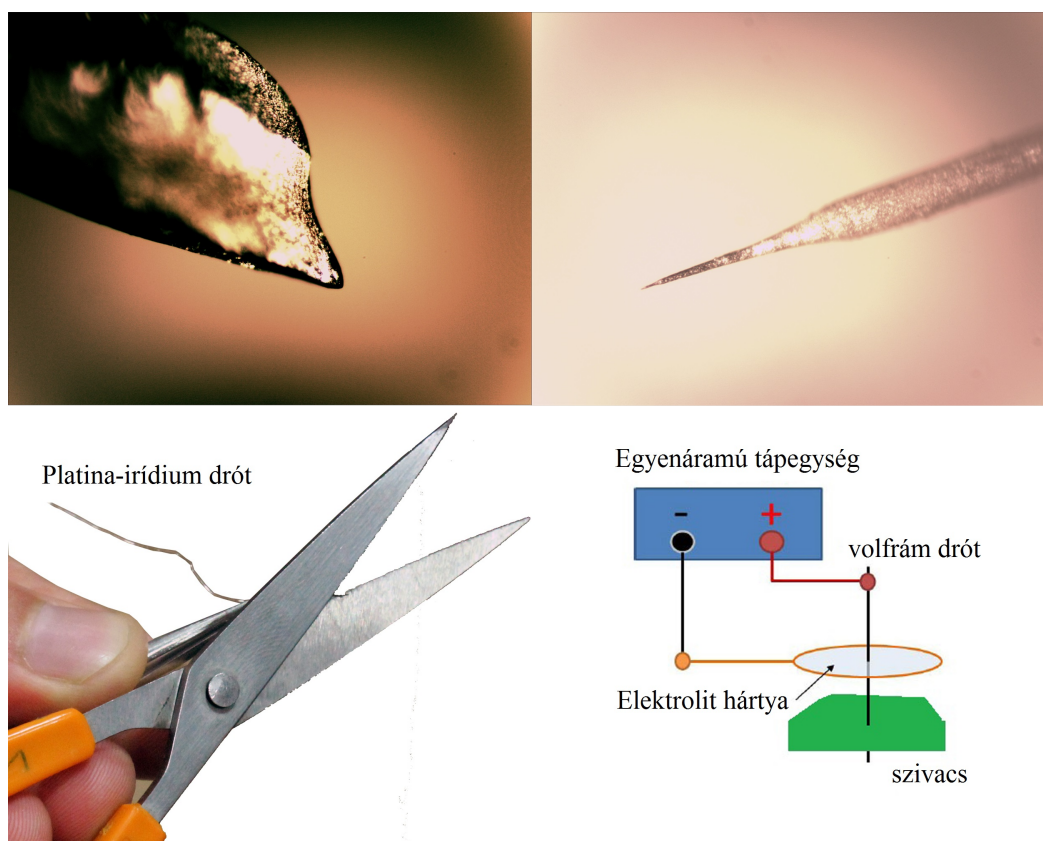
2.13. ábra. USB-s mikroszkóppal felvett minta-tű közelítés pillanatképei. A képeken a tű és annak tükörképe látható az arany mintán. A tű-minta távolság  $10\ \mu\text{m}$ -nél kisebb távolságra is beállítható a mikroszkópnak köszönhetően.



2.14. ábra. A közelítés hatására a léptetőmotorra és a  $Z$  piezo-ra adott feszültségjelek sematikusán ábrázolva.

## 2.2.6. Tűhegyezés

A tű kihegyezése alapvetően kétféle módszerrel történhet: mechanikai vágással, illetve kémiai marással. Az mechanikai vágásnál egy egyszerű fogóval vagy ollóval éles szögben folyamatos húzás mellett vágjuk el a tű anyagát. A módszer előnye, hogy kis gyakorlattal egészen kiváló felületű tű alakítható ki vele, egyszerűen és gyorsan. Tudni kell azonban, hogy az ilyen módon készült tű minősége hagy némi kívánni valót maga után: nagyobb görbületi sugárral bír, mint a kémiai marással készített, több hegygel is rendelkezhet, és nagy nyílásszöge van. Mindezek ellenére sík mintán (pl.: HOPG<sup>2</sup>) elérhető velük atomi felbontás, köszönhetően az alagútáram karakterisztikájának: csak a mintához legközelebb eső csúcs fog szerepet játszani a képalkotásban.



2.15. ábra. Optikai mikroszkóppal készített képek az alkalmazott tűtípusokról és kialakításukról. Balra platina-irídium anyagú, mechanikai vágással készült, jobbra pedig a volfrám anyagú, kémiai marással kialakított STM tű, és a kémiai maratás összeállítása látható.

A második lehetőség az elektrokémiai marás, amivel igen szabályos, kiváló profillal

<sup>2</sup>HOPG = Highly Ordered Pyrolytic Graphite

rendelkező tűhegy készíthető, akár néhányszor 10 nm-es görbületi sugárral. Erre gyorsan változó struktúrájú felületek esetén van szükség, például a későbbiekben tárgyalt vákuum-párologtatott DVD lemez minta esetén, melyeknek csíkszélessége 320 nm, a lyukak mélysége pedig 120 nm. Ekkor ugyanis a mechanikai vágással előállított tű nem képes lekövetni a felület struktúráját a tűhegy geometriája miatt [17].

A tű anyagának ezenfelül keménynek kell lennie, hogy a mintába való esetleges belenyomódáskor se deformálódjon nagy mértékben, és atmoszférikus nyomásokon használt STM berendezéseknél a kémiai inertség is fontos követelmény. Elterjedten használnak volfrám és platina-irídium tűket. A volfrám ugyan oxidálódik szabad levegőn, de az oxidréteg kialakulásának skálája napokban mérhető. A platina-irídium ötvözet pedig mind a mechanika szilárdság mind kémiai inertség szempontjából kielégítő.

Mechanikai vágásnál sokkal jobb minőségű tűk gyárthatóak kémiai maratással. Bár létezik platina-irídium tűre kialakított eljárás is [18], de egy egyszerűbb, labor körülmények között is megvalósítható megoldás a volfrám elektrokémiai marása. Az eljárás szerint készíteni kell egy 1 M koncentrációjú KOH oldatot. Szükséges egy volfrám drótból készített hurok, amelyet az oldatba mártva a felületi feszültség miatt egy kis elektrolit hártya képződik (2.15 ábra jobb alsó sarka). Ezen a hártyán függőlegesen keresztül vezetjük a maratni kívánt volfrám szálát és feszültséget kapcsolunk a hurok és a szál közé. A szálra pozitív, 20V körüli, a hurokra negatív feszültség kerül. Ha nem használunk áramkorlátot, akkor a túl nagy áram által heves reakcióban keletkező gázbuborékok tönkretelhetik a hártyát, ezért érdemes 10 mA-re korlátozni az átfolyó áramot. A maratott szál a hártya mentén fog elvékonyodni, egy idő után a saját súlyától szétszakad és leesik. Hogy a tű hegye ne érintkezzen semmivel, egy szivacsdarab kerül a szál aljára. Így mikor maratás után leesik, a hegye felfelé áll majd [12].

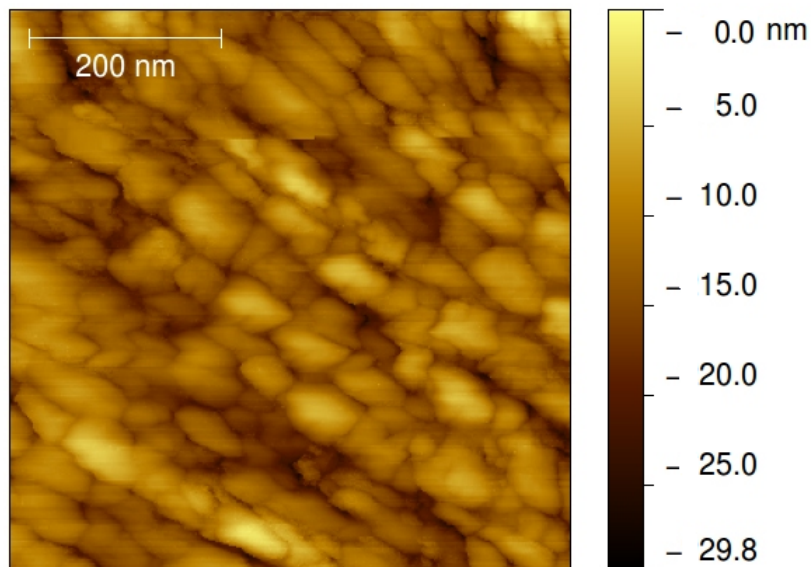
## **2.3. Demonstrációs STM-hez készített minták**

A továbbiakban röviden ismertetem az elkészített demonstrációs STM-hez készített mintákat, és ezek mért topográfiáját.

### **2.3.1. Vákuumpárologtatott arany minta**

Atmoszférikus nyomáson és szobahőmérsékleten alkalmazott STM esetén a legkézenfekvőbb az arannyal lepárologtatott felületű minta. Az arany kémiaileg ellenálló, nem képződik rajta zavaró oxidréteg, valamint jól ismert, változatos felületi struktúrát mu-

tat. A hordozóra (tipikusan Si) történő vákuumpárolgatáskor a minta felszínén 10-100 nm-es átmérőjű arany szemcsék alakulnak ki.



2.16. ábra. Szilícium hordozóra párolgatott arany felület demonstrációs STM-mel készített képe.

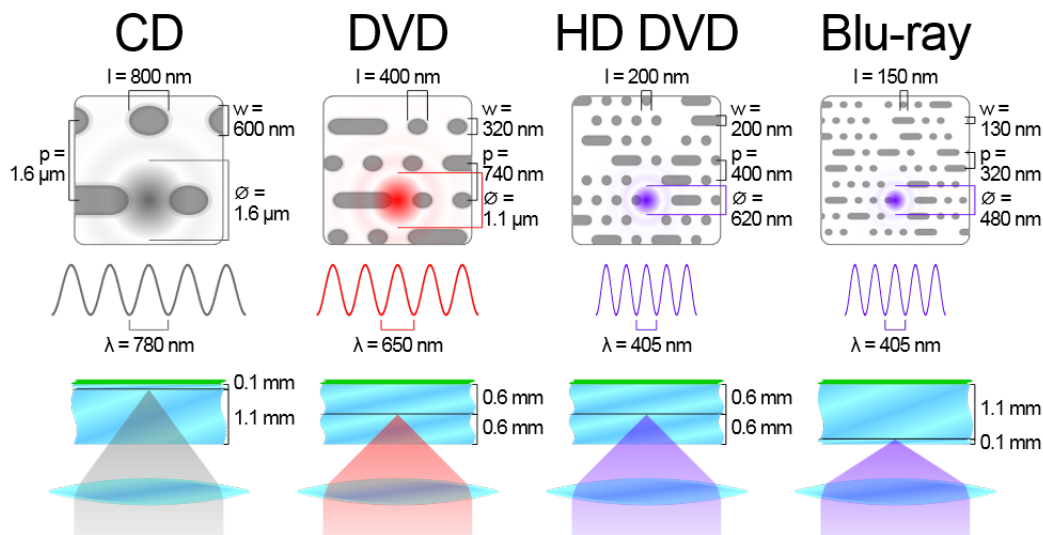
A 2.16 ábra a *Gwyddion* nevű nyílt forráskódú szoftverrel készült. Mivel a minta felülete kellően sima, ezért elegendő hozzá a mechanikai vágással kialakított platina-irídium tű is, amelyet egy demonstrációs mérés esetén akár a helyszínen el tudok készíteni. További előnyös tulajdonsága az arany felületnek, hogy amennyiben a tű mégis belenyomódik a mintába, akkor sem roncsolja nagy mértékben a felületet (nyilván a lokális topográfiát megváltoztatja, de a minta továbbra is mérhető). Ebből következik, hogy ez a minta sokszor használható, robusztus, amely nagyon fontos szempont egy demonstrációs eszköznél.

### 2.3.2. Vákuumpárolgatott DVD minta

Az „egyszerű” arany felület mellett szerettem volna másfajta topográfiával bíró mintát is készíteni a demonstrációkhoz. Olyan struktúrában gondolkodtam, amely az egész felületre kiterjed,  $XY$  irányú kiterjedése belefér a mikroszkóp maximális  $1 \times 1 \mu\text{m}$ -es pásztázási ablakába, és  $Z$  irányú kiterjedése 100 nm-es nagyságrendbe esik. Ha a struktúra az egész felületre kiterjed, akkor nem szükséges a tű mintán történő pozicionálása, a felület bármely pontján végezhető mérés.



Ekkor keltette fel a figyelmem az optikai adattárolásban használt lemezek esetleges felhasználása. Ismeretes, hogy e lemeztípusok esetén egy lézernyaláb segítségével kis méretű lyukakat, úgynevezett *pit*-eket égetnek a polimer anyagú lemezbe. A *pit*-ek alakja, és karakterisztikus méretei jól specifikáltak, és a kívánt nagyságrendbe esnek. A 2.17 ábrán összefoglaltan látható az egyes lemeztípusok *pit*-jeinek mérettartománya:



2.17. ábra. Az optikai adattároló lemezek jellemzői. <sup>3</sup>

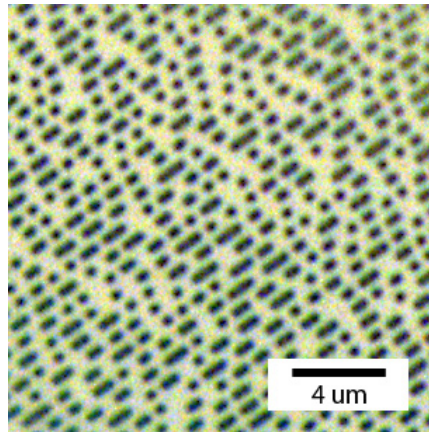
DVD lemez esetén kedvező a helyzet mintakészítés szempontjából, ugyanis a sáv távolság már  $< 1 \mu\text{m}$ , és az egyes *pit*-ek csak 300 nm szélesek. Öröndetes tény, hogy egy  $1 \times 1 \mu\text{m}$ -es pásztázási ablakba így csak nagyon kis valószínűséggel nem esik semmilyen mintázat. Tehát a DVD lemez, és persze az ennél nagyobb adatsűrűségű HD DVD, valamint Blu-ray lemezek kifejezetten alkalmasak demonstrációs STM mintának.

Fontos megjegyezni, hogy a mintakészítés egyik fenti esetben sem könnyű. A *pit*-ek ugyanis sosem egy könnyen leválasztható réteg hátulján találhatóak, hanem két összeragasztott polimer réteg között. Szerencsére az Atomfizika Tanszékről hozzájutottam egy közvetlen gyártótól származó DVD lemez darabhoz, amelyet nem ragasztottak össze a védőrétegével, így a *pit*-ek ezen „fél lemez” felszínén közvetlenül hozzáférhetőek voltak.

A minta elkészítése elsőként a DVD lemez feldarabolásával kezdődött.  $1 \times 1,5 \text{cm}$ -es téglalapokat vágtam ki a polikarbonát lemezből, ügyelve, hogy semmiképpen se sértsem meg a *pit*-eket a lepárolgatatandó részen. A preparátumok szélére egy  $\varnothing 3$ -mas furat is került, hogy a párolgatató mintatartóhoz rögzíteni lehessen. A felület megtisztítását nitrogénpisztollyal és etanollal végeztem.

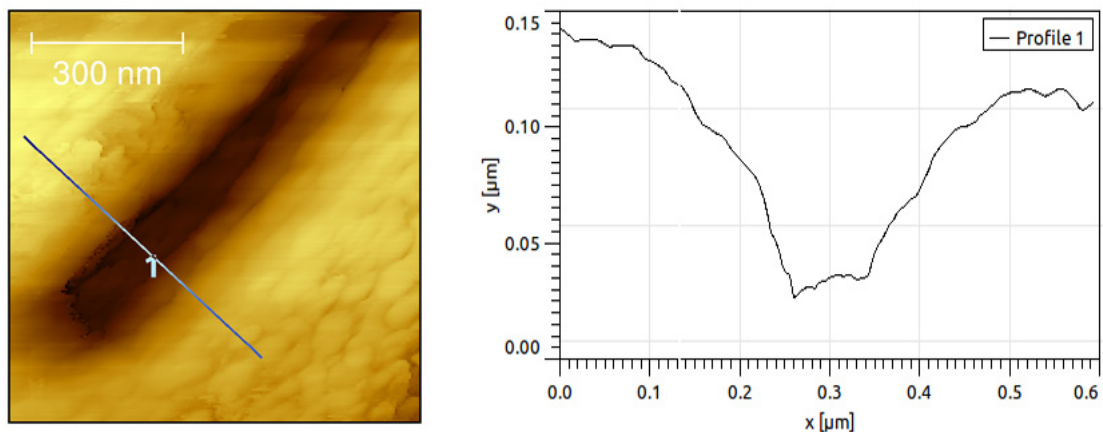
<sup>3</sup>Kép forrása:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Comparison\\_CD\\_DVD\\_HDDVD\\_BD.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Comparison_CD_DVD_HDDVD_BD.svg)



2.18. ábra. A DVD lemezből készült STM minta *pit*-jei vákuumpárolgatás után, optikai mikroszkóppal megjelenítve. A képen hamis színezést alkalmaztam, a jobb láthatóság érdekében.

A vákuumpárolgatásban Csontos Miklós nyújtott segítséget. A DVD preparátum felszínére először 10 nm-es vastagágú titán réteget párolgattunk, majd erre 40 nm-es arany réteg került. A vékony titán réteg használatát az indokolta, hogy a polikarbonát rétegre felvitt arany nagyon könnyen leválik a hordozó felületéről, a titán pedig nagyon reaktív fém, mely mintegy „kötőanyagként” szolgál az arany és a hordozó között. A kész mintát optikai mikroszkóppal ellenőriztük (2.18 ábra). A minta végül egy nyáklemezre lett csavarokkal rögzítve, illetve ezüst paszta segítségével elektronikusan ki lett kontaktálva a mintaáram méréséhez.



2.19. ábra. Egy hosszú *pit* demonstrációs STM-mel készített topográfiája. Jobbra a bal képen látható 1-el jelölt egyenes mentén készített metszet látható.

A DVD minta esetében sajnos a mechanikai vágással készített platina-irídium tű nem alkalmas a felület, illetve a *pit*-ek alakhú rekonstrukciójára, ezért csakis elektrokémiai marással készített volfrám tűvel érdemes mérni. Az 2.19 ábrán egy hosszú *pit* alagútmikroszkópos képe látható. Szintén a *Gwyddion* program segítségével készítettem a 2.19 ábrán látható *pit*-re merőleges profilt is, hogy minősíthessem a mérőműszer pontosságát. Az látható, hogy a tű a *pit* alját is megfelelően pásztázta, viszont a várt négyszögletes profil helyett a függőleges oldalak „lankás domboldalként” mutatkoznak. Ennek oka a vákuumpárologtatással felvitt aranyréteg élsimító hatása.

Pásztázó alagút mikroszkóp használatakor alapvetően felmerülő igény az atomi felbontás elérhetőségének vizsgálata. Hangsúlyoznám, hogy a tervezésnél nem volt célom az atomi felbontás elérése, hanem a demonstrációs kísérletek bemutathatóságának megbízhatósága és reprodukálhatósága. Ennek ellenére végeztem kísérleteket arra nézve, hogy alkalmas-e a megépített demonstrációs STM atomi felbontásra, azonban nem jártam sikerrel. Korábban a Magyarkuti András által fejlesztett STM rendszernél sikerült HOPG mintán atomi felbontást elérni [12]. A két rendszer azonos típusú piezoelektromos mozgatókat és vezérlőegységeket használ, de a piezo-feszültségek erősítését szolgáló erősítő valamint a rezgésmentesítő különbözik a két STM-nél. Feltehetően tehát a rezgésmentesítő állvány és az piezo-erősítő zaja akadályozza meg az atomi felbontás elérését.

## 2.4. A demonstrációs STM bemutatása

A munkám célja egy olyan STM megtervezése és kivitelezése volt, amely könnyen szállítható, megbízható működésű és jól demonstrálhatóak vele a különböző atomi szintű effektusok. Az elkészített STM berendezés látható a 2.20 ábrán. Az eszköz működésének bemutatására egy angol nyelvű posztert készítettem (lásd. 2.26 ábra a mellékletben).

Szeretném most összefoglalóan leírni, hogy egy demonstráció alkalmával miként lehet használni az elkészített eszközt.

A bemutatót az STM alapvető működésének ismertetésével kezdem. A mellékletben található poszter segítségével, az azon lévő ábrák magyarázatával ez gyorsan és hatékonyan kivitelezhető. Ezután *VLC* lejátszóval megjelenített, külső monitoron megjelenő mikroszkópos képen mutatom meg a mérőfej egyes részeit: a tűt, a piezo-kat, valamint az aranymintát. Miután elmagyaráztam a manuális és automatikus közelítés működését, ezeket a gyakorlatban is kivitelezem, és a tűvel atomi távolságra megközelítem a mintát, miközben a hallgatóság *in situ* nyomon követheti ezen műveletet. Mikor a tű kellőképpen

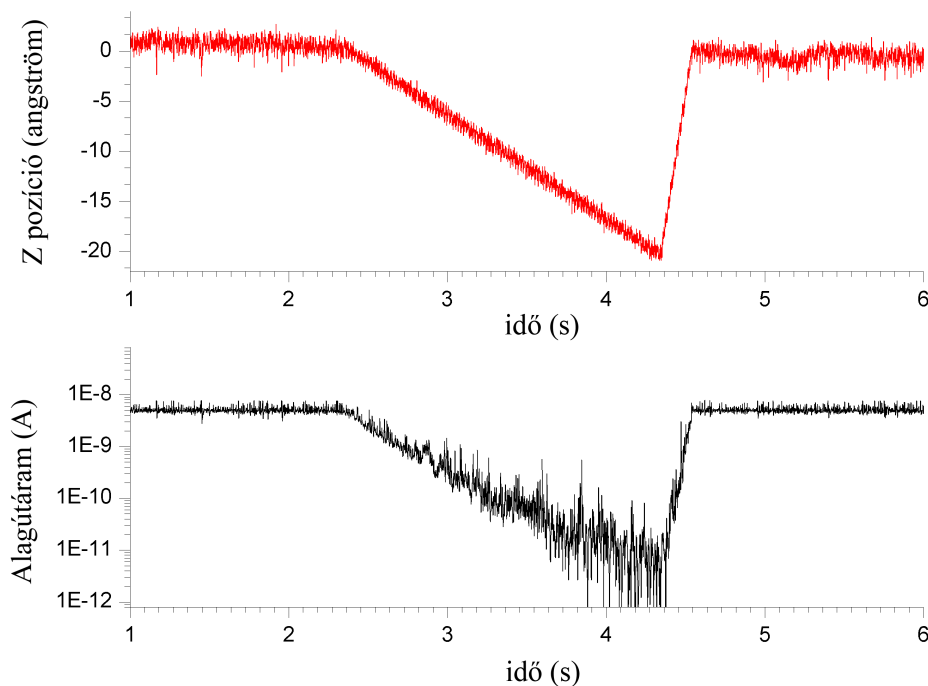


2.20. ábra. A demonstrációs célú STM összeállítása.

megközelítette a mintát, részletesen beszélek az alagútáramról és a PI szabályozó köréről. Az alagútáram távolságtól való exponenciális függését később a felületi pásztázás megkezdése előtt demonstrálok. A GXSM-ben kikapcsolva a PI szabályozást a tűt adott  $\Delta Z$  magassáig el lehet távolítani a felülettől. A mozgatus sebessége meglehetősen kritikus ebben az esetben, hiszen ha túl gyorsan mozgatusjuk a tűt, akkor az alagútáram gyors változását egyszerűen nem lehet megjeleníteni. A 2.21 ábrán egy ilyen távolítást és a közben mérhető alagútáramot jelenítettem meg egy közös grafikonon.

A pásztázás szemléltetését egy 4 csatornás digitális oszcilloszkóp segíti, melynek a képernyőjén megjelenő kép egy külső monitorra, vagy projektorra csatlakoztatható. Ennek segítségével időben nyomon követhető az  $XYZ$  piezoelektromos mozgatókra adott feszültség, valamint az alagútáram. Egy ilyen grafikon látható a 2.22 ábrán.

Az alagútáram monitorozásával könnyen megmutathatóvá válik az eszköz mechanikai stabilitása, ahogyan azt stabilitás vizsgálatoknál a 2.2.4 részben is leírtam. Konstans alagútáramot beállítva megmutatom, hogy a tű-minta távolságot alapvetően milyen meglepően pontosan képes tartani a szabályozó kör, majd kitekerek a környezeti tényezőkre, melyek ezt befolyásolják. Egyszerű mechanikai gerjesztés gyanánt egy tapssal vagy dobogással zavarom meg a rendszert, aminek hatását szemléltetem a  $Z$  pozícióban és az

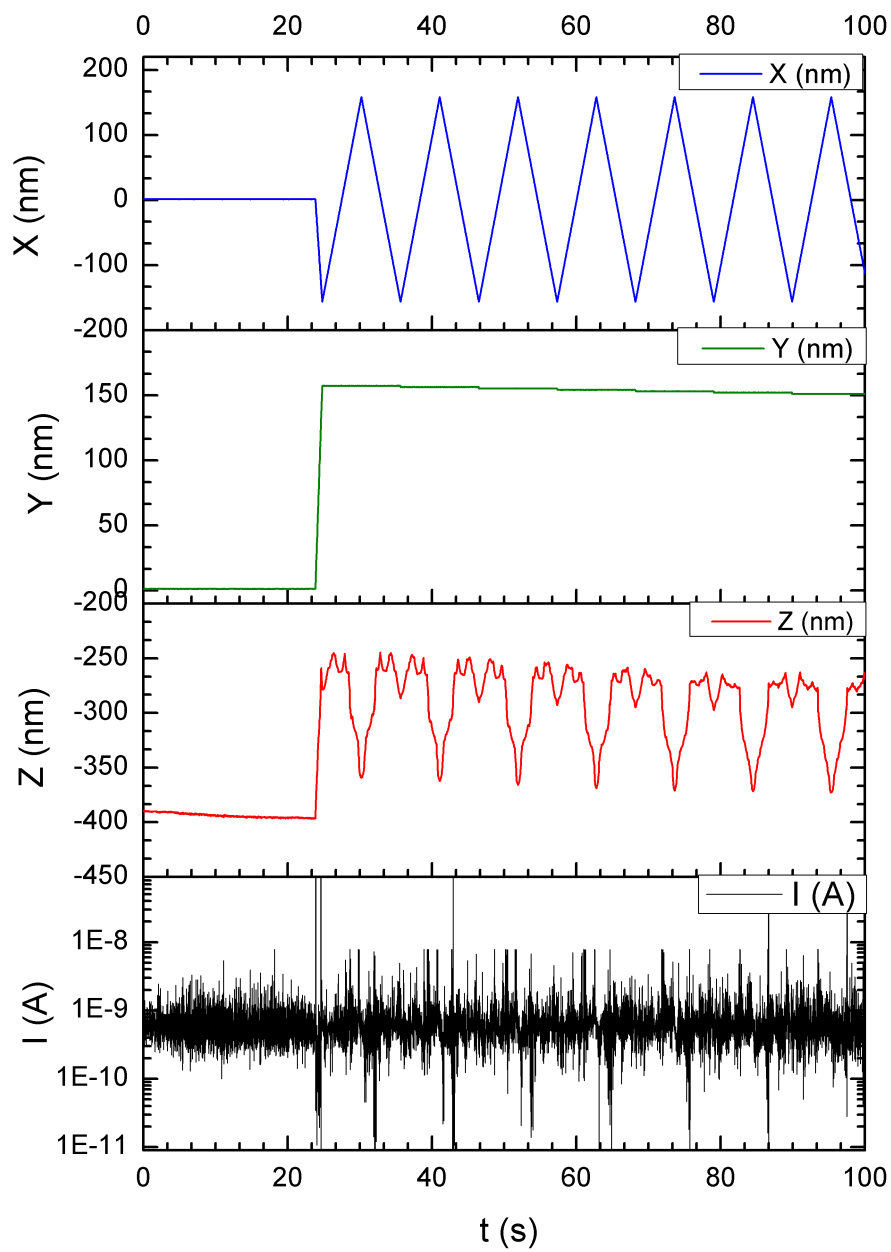


2.21. ábra. A tű 20 Å-mel történő lassú eltávolítása a minta felületéről. (felül) Az alagútáram exponenciális csökkenése a tű felemelése közben (alul).

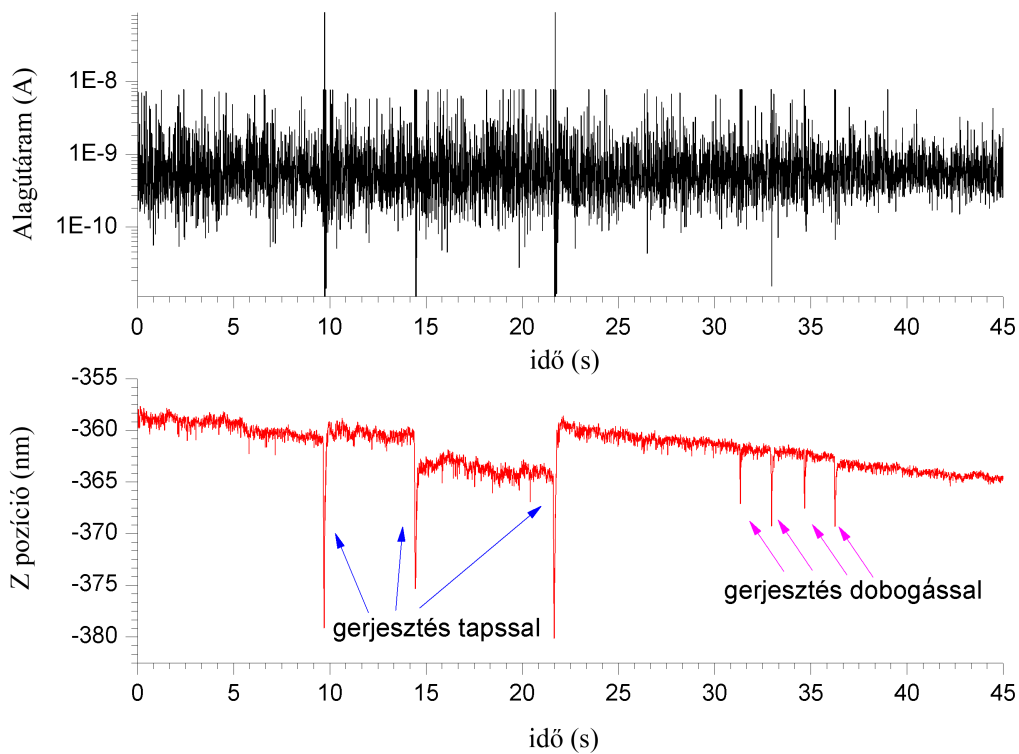
alagútáramban (lásd. 2.23 ábra). Finoman meglökve a rezgésmentesítő gumikötélét, a rendszer csillapodó harmonikus rezgőmozgásba kezd, ahogyan azt a 2.12 ábrán korábban bemutattam. Itt tudom felhívni a figyelmet arra, hogy milyen gyorsan lecseng ez a rezgés mind a horizontális, mind a vertikális gerjesztések esetén, ami a rezgésmentesítő jóságát tükrözi.

Végül áttérek egy másik képkalkotási problémára, amely a hőmérsékleti *drift*-ből adódik. Könnyen megmutatható a  $Z$  piezo-feszültség időbeli változásából, hogy amennyiben a rendszerben a hőmérsékletváltozás hatására hőtágulás jelentkezik, akkor a szabályozó körnek ezt kompenzálnia kell, hiszen a tű-minta távolság megváltozott. Ennek demonstrálására egyszerűen kinyitom a teremben lévő egyik ablakot, és rámutatok arra, hogy a  $Z$  piezo-feszültség változás - amely természetesen sokkal nagyobb időskálájú, mint a mechanikai gerjesztések esetén - mekkora elmozdulásnak felel meg. Ez nagyságrendileg akár több mint 100 nm is lehet, ahogyan az a 2.24 ábrán is látható.

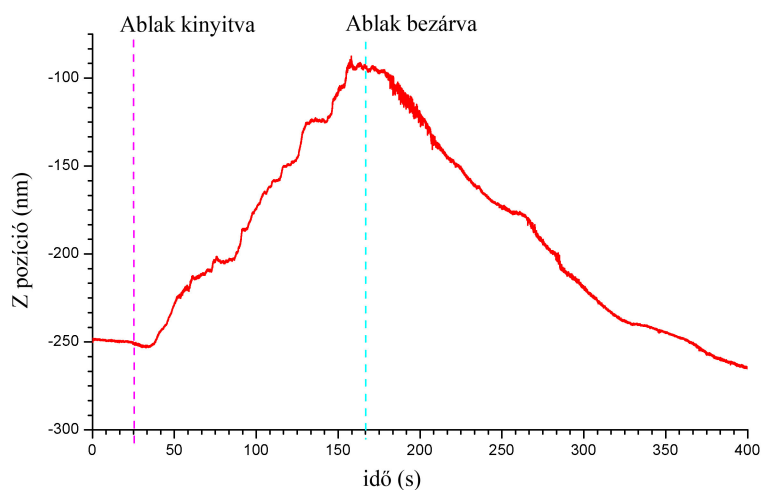
Mindezek után kezdődhet a pásztázás folyamata. Itt válnak érdekessé az oszcilloszkóp által mutatott  $X$  és  $Y$  piezo-feszültségek: az időbeli változásukkal a pásztázás kivitelezése könnyen nyomon követhetővé és mérhetővé válik. Alapvetően olyan felbontást és pásztázási ablakot kell alkalmaznom, amely egy előadás alatt megmutatható topográfát



2.22. ábra. Az egyes piezoelektromos mozgatók pozícióinak időfejlődése a felület pásztázásának megkezdésekor. A pásztázott ablak mérete  $300 \times 300$  nm, az alagútáram célértéke 0,6 nA.

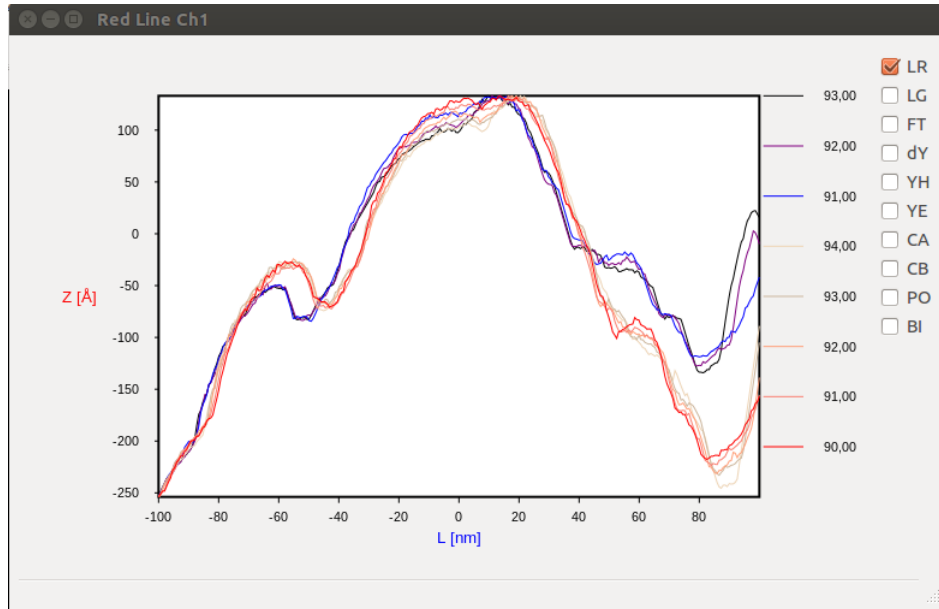


2.23. ábra. Az STM berendezés megzavarása tapssal és dobogással. Jól látható, hogy a taps sokkal drasztikusabb gerjesztés, mint a dobogás; a szabályozórendszer nem tudja lekövetni a tapsot, ezért az alagútáramban tüskék keletkeznek.



2.24. ábra. A hőmérsékleti *drift* szemléltetése a bemutatóteremben lévő ablak kinyitásával, majd bezárásával. A hőtágulásból eredő  $Z$  irányú elmozdulás 100 nm-es nagyságrendű.

biztosít. Tipikusan 300 nm-es ablakot választok, 1 nm-es felbontással. Megfelelő PI paraméterekkel és pásztázási sebességgel a teljes ablak kb. 10 perc alatt végigpásztázható. A pásztázás során a GXSM által kirajzolt, úgynevezett *linescan* ablakot mutatom be, amely egy soron való elhaladás közben mért profilt mutatja.



2.25. ábra. A GXSM által kirajzolt vízszintes soron oda és vissza haladó tű által felvett alagútáram profilok. A piros színű árnyalatok jelölik az egyik, a kék színárnyalatok a másik irányban felvett profilt. A halványabb színek a korábbi sorokon pásztázva felvett profilokat jelölik.

Ezen a ponton már jó képet kaphat a hallgatóság a minta karakterisztikus méreteiről. Minden mérésnél megjelenítem egyúttal a visszafelé haladó tűvel alkotott képet, hogy össze tudjam hasonlítani a pásztázott topográfiával. Ideális geometriájú tű, és lineáris piezoelektromos mozgató esetén a két kép megegyezik; így ez a módszer diagnosztizálni tudja ezen okokból eredő képalkotási hibákat. A pásztázás közben elfordulhatnak más képalkotási hibák is, mint sorszakadás, felületi nem-vezető szennyeződések vagy a tű mintába való belenyomódása. Ezeket részletesen ismeretem, illetve beszélek arról, hogy miként lehet őket megelőzni.

A demonstrációs STM-mel sikeresen végeztem kísérleti bemutatót a Fizika Tanszék által szervezett „Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak” című mérési szakkörön<sup>4</sup>. Itt jegyezném meg, hogy a demonstrációs STM mérőfejet is tulajdonképpen az erre a szak-

<sup>4</sup>[http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Nobel-d%C3%ADjas\\_k%C3%ADs%C3%A9rletek\\_k%C3%B6z%C3%A9piskol%C3%A1soknak](http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Nobel-d%C3%ADjas_k%C3%ADs%C3%A9rletek_k%C3%B6z%C3%A9piskol%C3%A1soknak)



körre készített MCBJ<sup>5</sup> mérésben használt mérőfej továbbfejlesztésével valósítottam meg. Az MCBJ eszközzel a diákok egy vékony arany vezetőket szakítanak el és nyomnak össze periodikusan, és közben mérik a kontaktus vezetőképességét. A méréssel kimutatható a vezetőképesség kvantáltsága, az alagútáram exponenciális távolságfüggése, valamint a PI szabályozással megvalósított meglepően pontos pozíciótartás. Tulajdonképpen ez az MCBJ eszköz egy egydimenziós alagútmikroszkóp, melyet további piezoelektromos mozgatókkal felszerelve STM-mé lehetne átalakítani. Pontosan ezért képezi a szakkör szerves részét a demonstrációs STM bemutatása is. Végül, de nem utolsó sorban szeretném megemlíteni, hogy a demonstrációs STM a jövőben számos helyen kerül majd bemutatásra, legközelebb a TTK kari, illetve az egyetemi nyílt napon, emellett MSc-s gépészmérnök és villamosmérnök hallgatók modern fizika előadásain, valamint várhatóan fizikus hallgatóknak tartott előadásokon is.

Zárásként szeretném kiemelni, hogy a kialakított kisméretű, flexibilis STM vezérlőegységek a demonstrációs célú STM kiszolgálásán túl kutatási célokat is szolgálnak, ugyanis képesek kiváltani a nagyméretű, helyhez kötött alacsonyhőmérsékleti STM vezérlőegységeket.

---

<sup>5</sup>MCBJ = Mechanically Controllable Break Junction, magyarul Mechanikus Törőkontaktus

# Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani a témavezetőmnek, Halbritter Andrásnak a széleskörű támogatásért, amelyet a dolgozatom megírásában, valamint a munkám elvégzésében nyújtott. Iránymutatása és szakmai tanácsai kiemelkedő szerepet játszottak a dolgozatom létrejöttében.

Köszönet illeti Magyarkuti András doktorandusz hallgatót az STM-mel kapcsolatos mérések, tervezések során felmerülő segítségnyújtásáért és a kiváló minőségű képek, felvételek készítéséért a két demonstrációs eszközről.

Az STM-nél használt arannyal bevont DVD lemez mintához a DVD lemezt Ujhelyi Ferentől kaptam, a párologtatást pedig Csontos Miklóssal végeztem az MFA-BME közös laboratóriumában található vákuumpárologtatóval; mindkettejüknek köszönettel tartozom.

Hálás vagyok a Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Kör munkacsoportjának a ködkamra megépítésének kezdeti állapotában nyújtott segítségért, kiemelve Buday Csabát a hőmérséklet méréshez használt mikrokontroller alapú vezérlőpanel megtervezéséért és kivitelezéséért.

Szeretném megköszönni továbbá Härtlein Károlynak a *FEINWERK NK2* típusú gyári ködkamra biztosítását, mely alapvető kiindulásként szolgált a demonstrációs célú ködkamra tervezésénél. További köszönet illeti Takács Gábort a ködkamrával kapcsolatos hasznos diszkusszióért.

A ködkamra és a pásztázó alagútmikroszkóp sem épülhetett volna meg a Fizika Tanszék műhelyében készült munkadarabok nélkül, ezért köszönettel tartozom a műhelyben dolgozóknak is.

# Irodalomjegyzék

- [1] Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám: „Kísérleti atomfizika”  
ELTE Eötvös Kiadó, 232-238., 262-263. old., Budapest, (1998)
- [2] Gyórfi Tamás, Raics Péter: „Diffúziós ködkamra - mutatni a láthatatlant (I. rész)”  
Fizikai Szemle, 22-26. o., (2014/1)
- [3] PHYWE: „Visualisation of radioactive particles / Diffusion cloud chamber”.  
Laboratory Experiments Physics, PHYWE SYSTEME GMBH, Göttingen, Germany
- [4] CERN cloud chamber workshop  
<https://teachers.web.cern.ch/teachers/document/cloud-final.pdf>
- [5] PHYWE, PJ45 diffusion cloud chamber manual
- [6] Dr. Vankó Péter: „Félvezető termoelem és Peltier-elem vizsgálata”, mérésleírás  
[http://fizipedia.bme.hu/index.php/F%C3%A9lvezet%C5%91\\_termoelem\\_%C3%A9s\\_Peltier-elem\\_vizsg%C3%A1lata](http://fizipedia.bme.hu/index.php/F%C3%A9lvezet%C5%91_termoelem_%C3%A9s_Peltier-elem_vizsg%C3%A1lata)
- [7] Feinwerktechnik: „Bedienungsanleitung NK 2 Nebelkammer”, Leipzig, (1974)  
<http://wignerjenoszakkollegium.hu/kiskor/sites/default/files/uploads/u5/NK-2%20kamrale%C3%ADr%C3%A1s.PDF>
- [8] K. N. Muhin: „Kísérleti magfizika”  
Tankönyvkiadó, 232-234. old., Budapest, (1985)
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA): NuDat 2, online nuclear database  
<http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
- [10] Gyórfi Tamás, Raics Péter: „Diffúziós ködkamra - mutatni a láthatatlant (II. rész)”  
Fizikai Szemle, 61-65. o., (2014/2)
- [11] Roland Schaefer: „Design and Construction of a Scanning Tunneling Microscope”,  
Carnegie Mellon Department of Electrical and Computer Engineering (1989)

- [12] Magyarkuti András: „Pásztázó szondás mikroszkóp fejlesztése”,  
Diplomamunka, (2013)
- [13] PI: „PICA shear actuators”, adatlap
- [14] Dr. Halbritter András: „A zaj mint jel”, mérésleírás  
[http://fizipedia.bme.hu/index.php/A\\_zaj\\_mint\\_jel](http://fizipedia.bme.hu/index.php/A_zaj_mint_jel)
- [15] P. Zahl, T. Wagner, R. Möller and A. Klust:  
„Open source scanning probe microscopy control software package Gxsm,”  
J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010)
- [16] SoftdB: „SPM Open Source Controller Model Mk2-A810”, adatlap  
[http://www.softdb.com/\\_files/\\_dsp\\_division/Specsheet%20SPM%20Controller.pdf](http://www.softdb.com/_files/_dsp_division/Specsheet%20SPM%20Controller.pdf)
- [17] Prof. Bharat Bhushan (editor): „Handbook of nanotechnology”  
Scanning probe microscopy, 630-631. old., Springer (2011)
- [18] B. L. Rogers, J. G. Shaptera, W. M. Skinner, K. Gascoigne:  
„A method for production of cheap, reliable Pt–Ir tips”,  
Review of Scientific Instruments, Vol. 71 4 (2000).

# Mellékletek

# Scanning Tunneling Microscope for demonstration purposes

Botond Sánta<sup>1</sup>, András Magyarokuti<sup>2</sup>, András Halbritter<sup>2</sup>

1. Department of Atomic Physics, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2. Department of Physics, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary

In education of physics demonstration experiments play an essential role. Nowadays nanotechnology is part of everyday life, so it is important to show experiments in this field. A scanning tunneling microscope (STM) is an instrument for imaging conducting surfaces even at the atomic level. I have designed and built a small, portable scanning tunneling microscope for demonstration purposes. There are some additional parts and features built in the STM, which serve better understanding of the operation and main principles of the device.

### 1. STM basics

Invented in 1981 by Heinrich Rohrer and Gerd Binnig

First device that could image individual atoms on the surface of the sample

Main principle: **quantum tunneling**

$$I \propto V_b \cdot e^{-A \cdot d \sqrt{\phi}}$$

**Constant current mode:** a feedback is used for the tunnel current. While scanning, the tip is moved perpendicular to the surface in a way, that the current is kept constant.

**Constant height mode:** the feedback is switched off, the tip is not moving perpendicular to the sample while scanning the surface. Topography can be extracted from the measured current.

### 3. Approaching and stability

**Coarse tip-to-sample moving**

Managed by a high resolution stepper motor (min step size approx. 1 μm)

Monitoring with an USB microscope

Approx. 1-10 μm distance is easily reachable only with coarse approaching.

Due to the precise positioning enabled by the optical microscope, the time for reaching the surface was decreased to less than a minute.

**Auto approach**

Stepper motor and piezo simultaneously used to reach the sample surface after coarse positioning.

Applied voltage to stepper motor

step with the motor

Surface was not reached

Surface successfully reached

**System stability**

Push out the tip

Current STD ~0.08 nA  
Setpoint is 0.6 nA

Tip-sample distance STD approx. 0.24 nm  
Temperature fluctuations cause tiny drift

### 2. STM setup

Control electronics, Piezo amplifier

STM probe

Elastic ropes for vibration isolation

10 kg steel block

Vibration insulation tripod stand

Full STM setup

Controlling computer running GXSM open source SPM controller [2]

### 4. Tips

**Platina-Iridium tip**

- Cut from a wire by scissors
- Electrochemical etching is also possible, but labor-intensive [3]
- No disturbing oxide layer is formed at atmospheric pressure
- Mechanical stability is good
- Suitable for examine flat surfaces and also atomic resolution

**Tungsten tips:**

- Generally made by electrochemical etching
- Oxid layer is formed at atmospheric pressure after one day
- Mechanical stability is better than Pt-Ir tip
- Excellent for topography with nanoscale objects (deep valleys)

**Mechanical shearing**

**Electrochemical etching**

Special etching method for W tips [4]

### 5. Measured samples

**Evaporated gold surface**

50 nm Au on Si substrate layer

- Gold clusters are formed on the surface
- Well known structure, non-oxidable, simple and

**Gold evaporated DVD surface**

DVD has a well specified nanoscale structure on it's full surface, so this sample is excellent for demonstration and validate the STM

Pit specifications [4]

- Width of a single pit: 320 nm
- Height of a pit: 120 nm
- Distance between two tracks of pits: 740 nm
- Shortest length of a single pit: 400 nm
- Longest length of a single pit: 1670 nm

Grids are also visible on flat part of surface

DVD „substrate“ with pits was evaporated with gold and stan to establish a conducting surface:

50 nm Au  
10 nm Ti  
DVD substrate

Trace of a long pit

DVD surface captured by STM

**Gold strips on gold surface**

Nanoscale strips made with electron beam lithography

- The sample originally created for low temperature STM-AFM device, but also useful for the demonstration STM
- Strips are located in 200 x 200 μm size rectangles
- The positioning of the tip to the structure is very hard, because of the small size of it (only 0.5 μm)
- Strips period: 300 nm
- Strips height: 50 nm

### 6. References

[1] A. Magyarokuti: Páztázó szondás mikroszkóp fejlesztése, MSc Thesis, Department of Physics, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary (2013)

[2] P. Zali, T. Wagner, R. Möller and A. Klust: Open source scanning probe microscopy control software package Gxsm, J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010)

[3] B. L. Rogers, J. G. Shapter, W. M. Skinner, K. Gascoigne: A method for production of cheap, reliable Pt-Ir tips, Review of Scientific Instruments, Vol. 71 4 (2000)

[4] Scott McMillan, DVD Optical System Design, [http://ece.colorado.edu/~ecen5616/WebMaterial/DVD\\_Optical\\_System\\_Design.pdf](http://ece.colorado.edu/~ecen5616/WebMaterial/DVD_Optical_System_Design.pdf)

2.26. ábra. A demonstrációs célú STM-hez készített angol nyelvű poszter.

52