

hogy abból a társaságból ennyien a pályán maradtunk, nagy részben e kurzusnak köszönhető.

Visszahallottam *Tichy Gézá*tól, akinek Frédi elmesélte, hogy a vizsgám jól sikerült. Ezen felbátorodva, felmentem hozzá a KFKI-ba, és megkérdeztem, hogy nem tudna-e ajánlani diplomamunka témavezetőt. Elkérte az indexemet, elbeszélgettünk, kiment, öt perc múlva visszajött és azt mondta, hogy Grüner György. Neki köszönhetően egy olyan társaságba kerültem, amelyik egy életre meghatározó volt számomra. Gyurka összehozott egy csoportot, amelyik párját ritkította. Tagjai (Jánossy András, *Holczer Karcsi*, *Mihály Gyuri*, Mihály Laci, *Kamarás Kati*, Hutiray Gyula...) fiatalok, sportosak, sikeresek és a fizikán túl is érdekesek voltak. Megcáfolták azt a sablonos felfogást, miszerint a tudósok kövérkések, kopaszodók, erős dioptriával rendelkeznek és egyedül ebédelnek a kantinban. Hatalmas élmény volt velük dolgozni, akiknek fő „műszere” a kreativitás volt. Sokáig ebbe a csoportba szerettem volna visszakerülni. Nem sikerült. De nekik sem. Szétszéledtünk a világba.

Frédi nyomon követte pályám alakulását. Amikor később Mihály Lacinál Stony Brookban nagyon felfutott a kutatás, és nagy részben ennek a periódusnak



Frédivel lausanne-i irodámban a '90-es évek végén.

köszönhetően tíz év múlva katedrát kaptam Lausanneban, nagyon örült neki. Nekem pedig nagyon jó érzés, hogy tagja lehetek ennek a magyar tudományos közösségnek, amelyik itt megjelent e születésnapj ünnepségen, amit az ő neve fémjelez. Köszönöm Frédi!

Forró László

Lausanne-i Műszaki Egyetem, Svájc

EGY DEMONSTRÁCIÓS KÍSÉRLET, AMELYBEN AZ ÁRAM EGYETLEN ATOMON KERESZTÜL FOLYIK

Sánta Botond, Magyarkuti András, Halbritter András
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék

Jelen írással – 80. születésnapja alkalmából – Zawadowski Alfréd előtt tisztelgünk, akinek meghatározó szerepe volt a BME Fizikai Intézetben folyó kísérleti nanofizika tárgyú kutatások elindításában.

Kevés olyan demonstrációs kísérlet ismert, amellyel egyetlen atom közvetlen hatása szemléltethető. Cikkünkben egy ilyen kísérletet ismertetünk, megmutatjuk, hogy egy feszültségforrásra kötött fémvezeték elszakításának utolsó pillanatában az áram egyetlen atomon keresztül folyik, és a vezetőképesség méréséből egyértelműen azonosítható az egyetlen atom átmérőjű nanovezeték kialakulása. Ezt a kísérletet kö-

zépiskolás diákok is kipróbálhatják a BME Fizika Tanszék által szervezett *Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak* szakkör keretében [1], illetve a kísérlet egyszerűsített változata kevés házi barkácsolással és egy megfelelő digitális oszcilloszkóppal is elvégezhető.

Az atomi felbontású mikroszkópiáról

A kísérlet bemutatása előtt azonban tegyünk egy kis kitérőt az atomi felbontású mikroszkópia irányába.

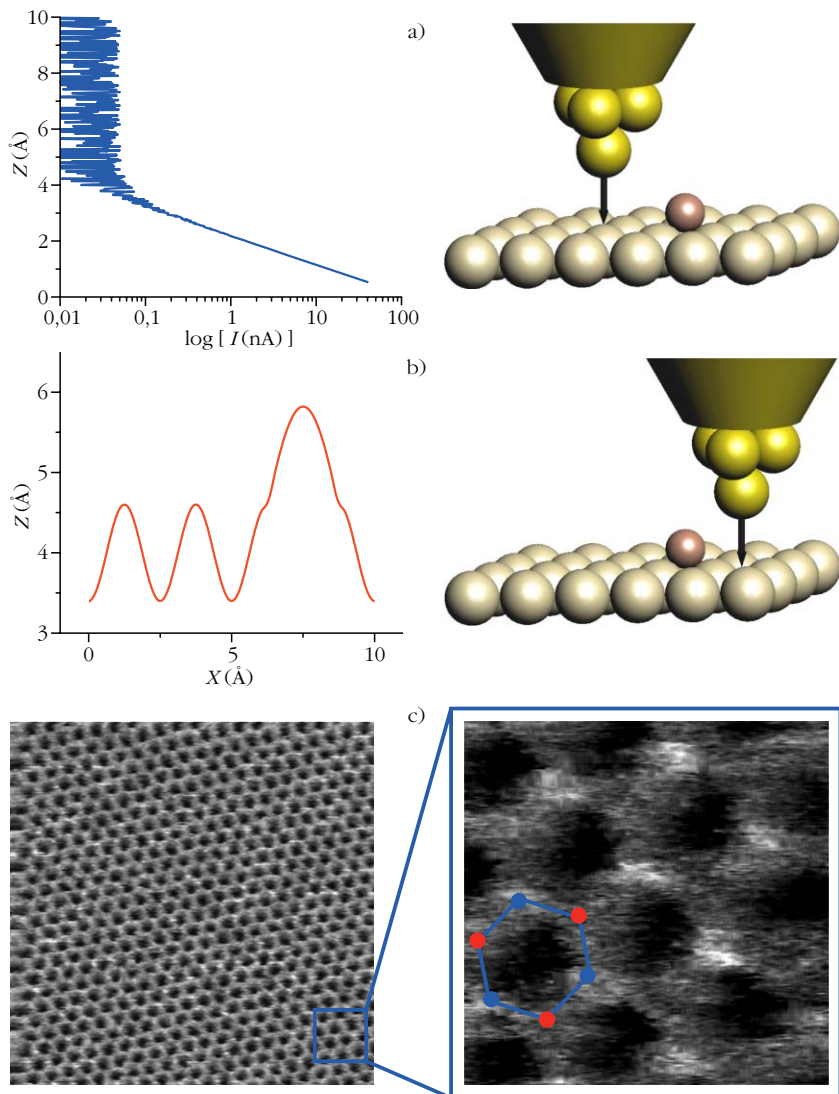
Már az ókori görögök is azt feltételezték, hogy az anyag atomokból épül fel. Ezt a hipotézist a 20. szá-



Sánta Botond 2016-ban végzett a BME fizikusképzésén. Jelenleg tudományos segédmunkatársként dolgozik a BME Fizika Tanszéken. A Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak szakkör egyik mérésvezetője, és az ott bemutatott demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkóp megalkotója. Kutatási területe atomi méretű memóriák vizsgálata.



Magyarkuti András 2013-ban végzett a BME fizikusképzésén, diplomamunkája keretében egy saját fejlesztésű kombinált pásztázó alagútmikroszkóp és atomerő-mikroszkóp berendezést épített. Jelenleg PhD hallgatóként dolgozik a BME Fizika Tanszéken. A Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak szakkör egyik mérésvezetője, a törökcontactus-mérést vezérlő program fejlesztője. Kutatási területe a molekuláris elektronika.



1. ábra. a) Egy hegyes fémtű és egy fémfelület közé feszültséget kapcsolunk, és – miközben a tűt közelítjük a felülethez – mérjük az áramot. Amíg a tű távol van a felülettől, az áram olyan kicsi, hogy az árammérőnkkel nem tudjuk felbontani. Ahogy a tű és a felület távolsága összemérhetővé válik két szomszédos atom távolságával, véges áramot kezdünk detektálni. Az áramot logaritmikus skálán ábrázoltuk, azaz egy osztás az áram tízszeres megváltozásának felel meg. A tű és a felület távolságát angström mértékegységben adtuk meg, ami 10^{-10} méternek felel meg. b) Miközben a tűt a felülettel párhuzamosan állandó sebességgel mozgatjuk, a felületre merőleges irányban úgy pozicionáljuk, hogy az alagútáram, azaz a minta és a tű távolsága konstans maradjon (jobb oldal). A tű mozgása alapján a felület képét akár atomi felbontással rekonstruálhatjuk (bal oldal). c) Atom felbontású kép grafitminta felületről. Forrás: Magyarkuti András diplomamunka, BME Fizika Tanszék, 2013.

zad elején számos kísérlettel sikerült bizonyítani, azonban ahhoz, hogy képet tudjunk készíteni egy anyag felületén lévő atomokról egészen 1981-ig kel-



Halbritter András egyetemi tanár, az MTA doktora, a BME Fizika Tanszék tanszékvezetője. Mérnöktudományi diplomáját és PhD fokozatát 1999-ben és 2003-ban szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe az atomi és molekuláris nanoszerkezetek kísérleti vizsgálata. A Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak szakkör ötletgazdája és egyik mérésvezetője.

lett várni, amikor *Gerd Binnig* és *Heinrich Rohrer* megépítették az első pásztázó alagútmikroszkópot, amiért öt évvel később Nobel-díjjal jutalmazták őket.

Az alagútmikroszkóp működése az elektronok hullámtermészetének egy speciális következményén alapul, miszerint két egymáshoz közeli fémdarab között akkor is folyik áram, ha azok nem érnek össze. Ezt az áramot kvantummechanikai alagútáramnak hívják, amelynek érdekes tulajdonsága, hogy a két fém távolságától nagyon érzékenyen, exponenciálisan függ:

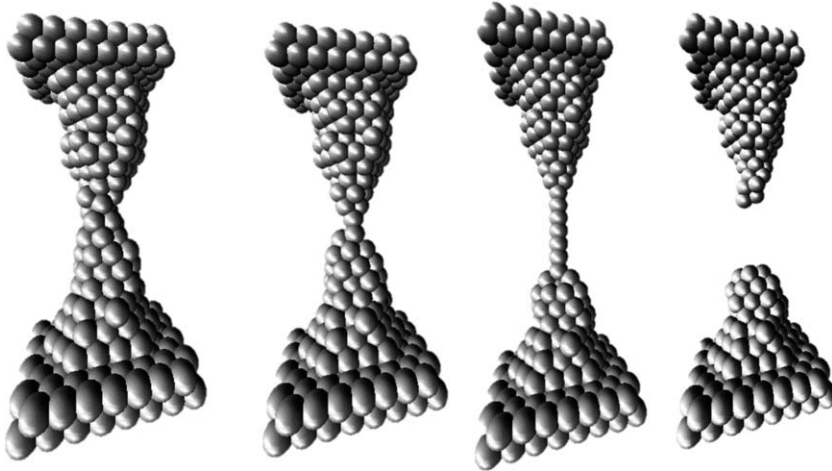
$$I \propto \exp\left(-2\pi\sqrt{8m\Phi}\frac{d}{b}\right), \quad (1)$$

ahol m az elektrontömeg, b a Planck-állandó, Φ az adott fémre jellemző kilépési munka, d pedig a két fémelektroda közötti rés szélessége. A legtöbb fémre tipikusan jellemző 4-5 eV-os kilépési munkával számolva, ha csak egy fél atom-atom távolsággal csökkentjük a két fémelektroda közötti rés szélességét, akkor az áram mintegy tízszeresére nő. Ezt a viselkedést demonstrálja az 1.a ábra.

Egy nem túl hegyes tű (például egy ollóval elvágott fémszál) esetén is találunk a tű hegyén egy atomot, ami a többi atomnál egy kicsit közelebb van a felülethez. Az érzékeny távolságfüggés miatt az alagútáram jelentős része ezen egyetlen atomon keresztül folyik. Ezt kihasználva – a tű megfelelő mozgatásával – akár atomi felbontással is feltérképezhetjük a fémfelületet. A fémfelülettel párhuzamosan pásztázunk a tűvel, eközben egy szabályozó áramkört használva, a felületre merőleges

irányban úgy mozgatjuk a tűt, hogy a mért alagútáram mindig állandó legyen, azaz a minta felületéhez képest a tű közel azonos távolságban mozogjon (1.b ábra). Számítógéppel rögzítve a tű mozgását rekonstruálhatjuk a felület képét. Az 1.c ábra egy grafitfelület pásztázó alagútmikroszkóppal készített, atomi felbontású képét mutatja.

A pásztázó alagútmikroszkóp tűjét piezoelektromos kerámiák segítségével, akár atomi precizitással mozgathatjuk. Piezokerámiával a hétköznapi életben is találkozunk, például az öngyújtó egy piezoelektromos hasáb hirtelen megnyomásával hoz létre nagy feszültséget, és az így keletkező szikra gyújtja be a lángot. Piezoelektromos mozgatónál pont fordítva



2. *ábra.* Nanovezeték szakadása. A két oldal széthúzása közben a nanovezeték egyre vékonyodik, végül csak egyetlen atom köti össze a két elektródát. Az egyatomos kontaktus további széthúzás hatására elszakadhat, de bizonyos anyagokban (például aranyban) akár egyetlen atom átmérőjű, több atom hosszúságú atomlánc is kialakulhat.

járunk el, a piezoelektromos hasábra elektromos feszültséget kapcsolunk, és ennek hatására a hasáb egy kicsit megnyúlik.

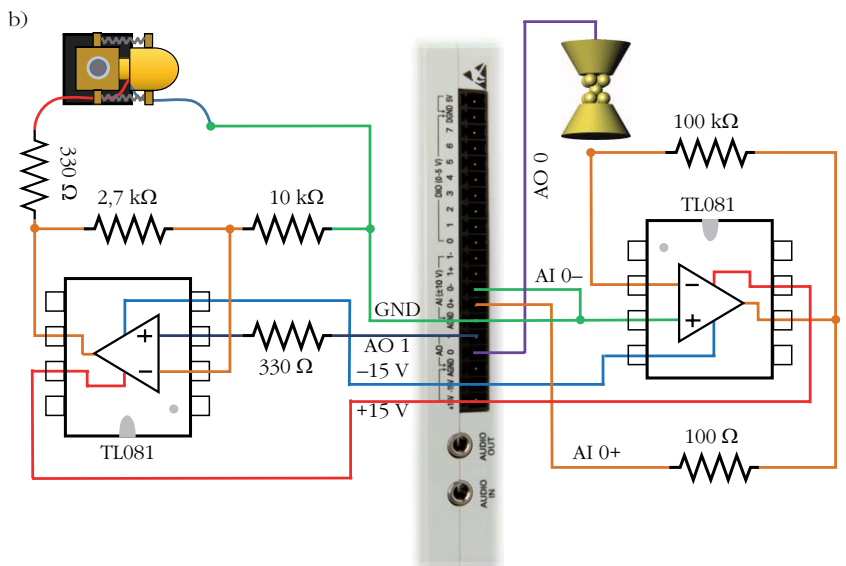
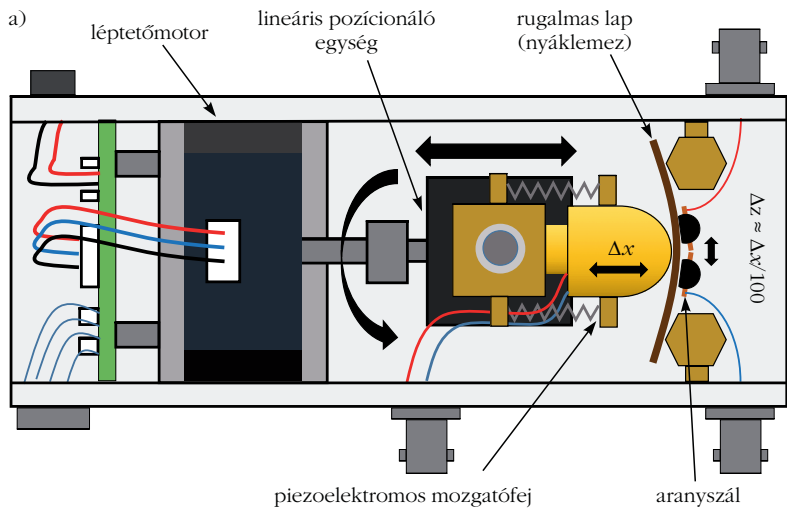
Egy pásztázó alagútmikroszkópot arra is használhatunk, hogy az elképzelt legvékonyabb nanovezetéket hozzuk létre. Ha a mikroszkóp tűjét a felületbe nyomjuk, majd elkezdjük visszahúzni, akkor egy nanovezetéket tudunk húzni a felület és a tű között. A széthúzás közben a nanovezeték egyre vékonyodik, majd a szétszakadás előtt már csak egyetlen atom köti össze a két oldalt (2. *ábra*). Ezzel vissza is kanyarodtunk a fémszál elszakítását bemutató kísérlethez.

Mechanikusan szabályozható törőkontaktus-technika

Egy atomi méretű nanovezetéket nem csak pásztázó alagútmikroszkóppal hozhatunk létre. Rendelkezésre áll egy egyszerűbb, de mégis precízebb módszer, az úgynevezett mechanikusan szabályozható törőkontaktus-technika, amelynek elvét a 3.a *ábra* szemlélteti. Egy fémszálát ragasztóval vagy forrasztással két közeli ponton egy rugalmas lapkához rögzítünk. A két rögzítési pont között egy penge segítségével elvékonyítjuk a fémszálát. A rugalmas lapkát a két végénél megtámasztjuk, középen pedig egy léptetőmotorral forgatott tengely, illetve egy piezoelektromos mozgató segítségével

hajlítani kezdjük. A lapka hajlítása közben a fémszál elszakad. Ezzel az elrendezéssel a nanovezeték tengelyére merőleges irányban nem lehet pásztázni, de vizsgálhatjuk a kvantummechanikai alagútáramot, megmérhetjük egy egyetlen atom átmérőjű nanovezeték ellenállását, és kipróbálhatjuk az alagútmikroszkópnál használt szabályozástechnikát. Az elrendezés alagútmikroszkóphoz képesti előnye a kiemelkedő mechanikai stabilitás. Kiszámolható, hogy a piezoelektromos mozgató Δx elmozdulása nagyságrendileg $\Delta x/100$ elmozdulást eredményez a vezeték két oldala között, így minden mechanikai rezgés vagy hőtágulásból adódó elmozdulás

3. *ábra.* a) Az atomi törőkontaktusos kísérleti berendezés vázlata (nem méretarányos). b) A mérésekhez használt National Instruments MyDAQ adatgyűjtőkártya és a hozzá kapcsolódó erősítő áramkörök kapcsolása.



mintegy százas faktorial csökkenített mértékben jelenik meg a nanovezeték megnyúlásában. Ennek köszönhető, hogy egy viszonylag egyszerű berendezéssel olyan kísérleteket végezhetünk, amelyekben atomi méretskálájú nanoszerkezetek tulajdonságait vizsgálhatjuk. A mérési elrendezésben a léptetőmotor, a piezoelektromos mozgató és a rugalmas lapkára rögzített fémszál egy alumíniumkonzolba rögzítve található (3.a ábra). A rugalmas lapka egy 1×3,5 cm-es nyáklap, amelynek közepén egy lombfűrész segítségével keresztbe vágtuk a rézborítást. A két oldal közé egy 100 μm átmérőjű aranyszálat forrasztunk, amelyet a két rögzítési pont között közepén egy borotvapenge segítségével egy kicsit bevágunk. (Az oxidáció és egyéb szennyeződés elkerülése érdekében használunk aranyvezeték.) Ezután a mintát a hatszög keresztmetszetű tartók és a rugóval összehozott réz tokban található piezoelektromos mozgató közé helyezük.

A fémszál elszakítása először durva mozgatással történik: egy léptetőmotor forgómozgását egy lineáris pozicionáló segítségével a laprugó közepét nyomó hosszirányú elmozdulássá alakítjuk. Miután a fémszál elszakadását detektáljuk (mintegy 100 mV-os feszültség mellett zérusra csökken az áram a fémszál két oldala között), egy piezoelektromos mozgató segítségével finoman tudjuk hangolni a fémelektrodák közötti távolságot. Megfelelő motorpozíció mellett a piezoelektromos mozgatóra adott maximális feszültséggel a szál elszakad, minimális feszültség mellett pedig összeér a két oldal, így csupán a piezofeszültség hangolásával vizsgálható a szakadás folyamata.

A motor és a piezoelektromos mozgató vezérlését, illetve a vezetőképesség mérését egy *National Instruments MyDAQ* típusú, számítógéphez csatlakoztatott adatgyűjtőkártyával végezzük, saját fejlesztésű, *LabVIEW* környezetben írt program segítségével. A méréshez szükséges kiegészítő áramköröket egy próbapanelen állítjuk össze. A méréshez alapvetően két egyszerű áramkörre van szükség (3.b ábra): az egyik a fémszál vezetőképességét méri áramerősítő kapcsolatban, a másik pedig a mérőkártya kimenő feszültsé-

gének kieroősítésével vezérli a piezoelektromos mozgatót. A léptetőmotort a mérőkártya által kiadott pulzusokkal vezéreljük, egy pulzus felel meg egy lépésnek, a forgásirányt pedig a motorra adott digitális feszültségszint határozza meg.

Vezetőképesség-lépcsők és -hisztogramok

A mérőrendszer megismerése után vizsgáljuk meg a mérési eredményeket! Ha csupán pár atom átmérőjű nanovezeték szakítása közben mérjük a vezetőképességet (azaz az ellenállás reciprokát), akkor a 4. ábra bal oldalán látható vezetőképesség-görbét kapjuk: a két oldal távolítása, azaz a piezofeszültség növelése közben a vezetőképesség nem folytonosan, hanem lépcsőzetesen csökken. Amikor lapos platót látunk, akkor a vezeték geometriája alig változik, az atomok csak rugalmasan távolodnak egymástól. Ugrásnál viszont az atomok hirtelen átrendeződnek, és az ugrás után már kevesebb atom köti össze a két oldalt. A szétszakadás előtti utolsó lépcsőnél az áram már csak egyetlen atomon keresztül folyik, majd az egyatomos kontaktus is szétszakad, és a vezetőképesség nullára (pontosabban az alagútáram által meghatározott kicsi értékre) csökken.

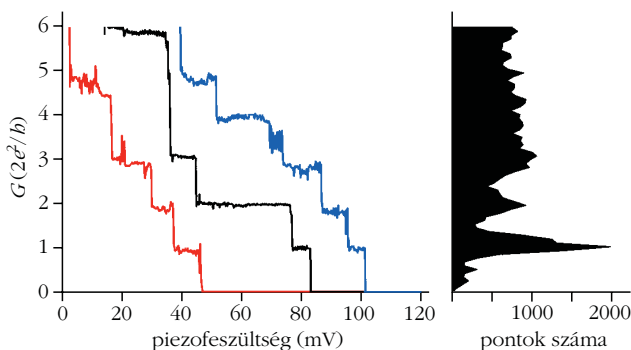
Egyetlen aranyatomon keresztül a vezetőképesség közel van egy univerzális állandóhoz, az úgynevezett vezetőképesség-quantumhoz, amelyet az elektron töltése és a Planck-állandó definiál:

$$G_0 = 2 \frac{e^2}{h}$$

Ez a vezetőképesség körülbelül 12,9 kΩ ellenállásnak felel meg, amelynek háttérben az áll, hogy az atomi méretű vezeték átmérője összemérhető az elektronok hullámhosszával, így a vezetési tulajdonságokat kvantummechanikai modellel kell leírni. Egyatomos átmérő esetén keresztirányban csak a legalacsonyabb energiájú állóhullámmódus a megengedett, azaz az áram csak egy móduson, másként szólva egyetlen vezetési csatornán keresztül folyik. Ha mindez még azzal is társul, hogy az atomi méretű nanovezetékbe bejutó elektronok szóródás nélkül átjutnak a kontaktuson (azaz az egyetlen nyitott vezetési csatorna transzmissziós valószínűsége 1), akkor egyszerű szilárdtestfizikai számolással megmutatható, hogy a nanovezeték vezetőképessége az univerzális $G_0 (= 2e^2/h)$ vezetőképesség-quantumnak felel meg [2].

Ha a szakítás után a két elektródát összenyomjuk, a szakítási felületen az atomok újra összekapcsolódnak, így a nanovezeték szakítását újra és újra megismételhetjük. Több ezer szakítás során felvett vezetőképesség-görbéből hisztogramot készíthetünk, amelyben csúcsok jelennek meg a gyakran előforduló atomi elrendeződések vezetőképesség-értékeinél. Az első csúcs az egyatomos kontaktus vezetőképességénél, azaz a vezetőképesség-quantumnál jelenik meg (4. ábra, jobb oldal).

4. ábra. Bal oldal: atomi méretű aranyvezeték vezetőképességének lépcsőzetes változása a vezeték elszakadása közben, három különböző mérés folyamán. Jobb oldal: több ezer szakítási görbe alapján készített vezetőképesség-hisztogram. Az első, $1 G_0$ vezetőképességnél található csúcs az egyatomos kontaktus vezetőképességét mutatja.



Atomláncok

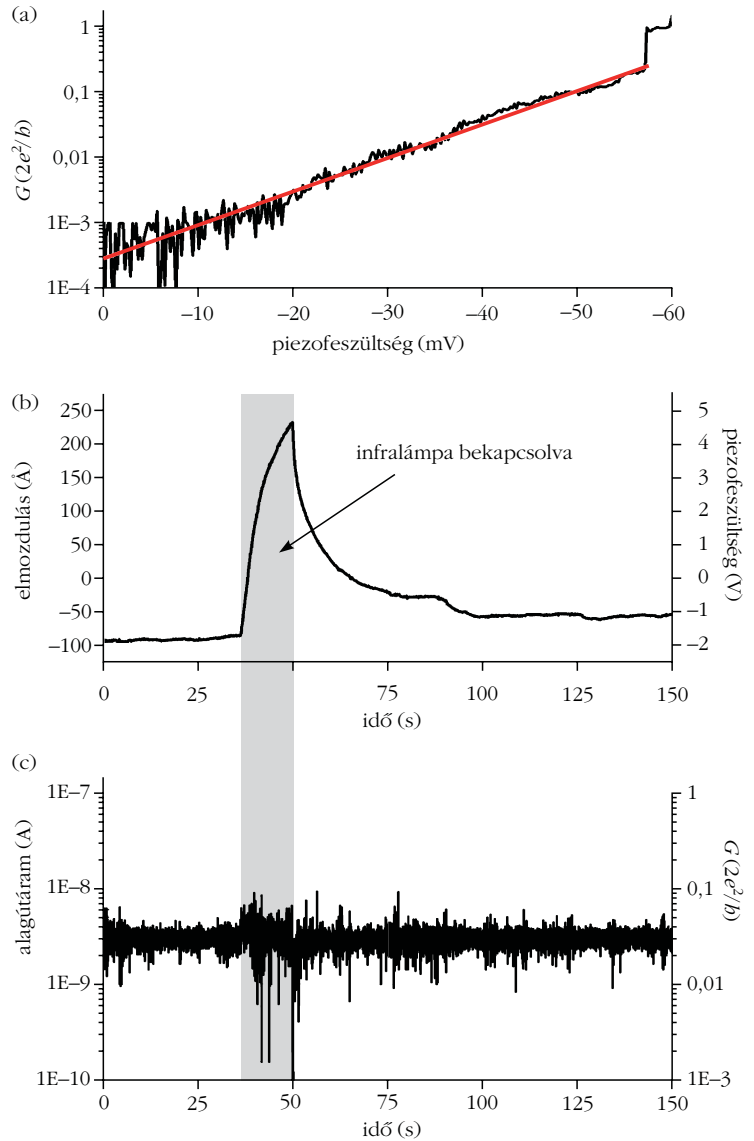
Arany nanovezetékeknel egy további érdekes jelenséggel is találkozunk. A szétszakadás előtti utolsó vezetőképesség-plató hosszát megmérve gyakran lényegesen nagyobb hosszt kapunk, mint amit egy atom méretéből várnánk. Megmutatható, hogy egy egyatomos aranykontaktus további széthúzása során az nem mindig szakad szét, hanem akár hét atomból álló atomi aranyláncot is húzhatunk (2. ábra).

Hétköznapi körülmények között egy 7 méter hosszú vezeték ellenállása pontosan hétszerese egy egyméteres vezetékdarabnak. Atom méretskálán viszont teljesen más viselkedést tapasztalunk. Egy hétatomos aranylánc ellenállása pontosan megegyezik a háromatomos láncéval vagy az egyatomos kontaktuséval, hiszen, ha az elektronok egyszer bejutnak a láncba, akkor már a lánc hosszától függetlenül ütközés nélkül átjutnak a túloldalra.

Alagútáram mérése és a két elektróda távolságának rögzítése 10^{-10} m-es pontossággal

A törökontaktus-elrendezéssel a pásztázó alagútmikroszkóp működésének alapját képező kvantummechanikai alagútáramot is tanulmányozhatjuk. Ehhez a vezetőképességet a szétszakított vezeték összeérintése közben érdemes mérni, az 5.a ábrán bemutatott mérési eredmény szerint a fémes kontaktus kialakulása előtt az áram valóban a két elektróda távolságának exponenciális függvénye. Persze a mérésben az elektródák távolságát nem ismerjük, csak a piezoelektromos mozgatókra adott feszültséget, amelynek megváltozása arányos az elektródák elmozdulásával. Az (1) képlet segítségével viszont megbecsülhetjük az elektródák elmozdulását, hiszen a képlet szerint 1 \AA elmozdulás az alagútáram mintegy egy nagyságrendnyi változásának felel meg, azaz az 5.a ábrán a piezofeszültség mintegy 20 mV-nyi változása felel meg 1 \AA elmozdulásnak.

Ha az alagútáram ilyen precízen mérhető, akkor érdemes kipróbálni a pásztázó alagútmikroszkópnál alkalmazott szabályozástechnikát is. Ennek lényege, hogy kijelöljük a két elektróda közötti nanorés szélességének $d_{cél}$ célértékét, és ha a rés aktuális d szélessége eltér ettől, akkor a piezoelektromos mozgatóra adott feszültséget úgy változtatjuk, hogy visszaálljon a megcélzott szélesség. Persze a rés pontos szélességét nem tudjuk, így az azzal arányos, közvetlenül mérhető mennyiségre, a vezetőképesség loga-



5. ábra. a) Alagútáram mérése. A vezeték két oldalát a piezofeszültség csökkenésével összeérintjük. Az összeérintés előtt exponenciálisan nő a vezetőképesség: a piezofeszültség mintegy 20 mV-os változása eredményez egy nagyságrendnyi vezetőképesség-változást, ami az (1) képlet szerint $\approx 1 \text{ \AA}$ elmozdulásnak felel meg. A görbe végén látható ugrás az egyatomos kontaktus kialakulását jelzi. b–c) Szabályozó áramkör segítségével stabilizáljuk a két elektróda közötti rés szélességét. Az idő függvényében mérjük az aktuális vezetőképességet (c) azaz, mennyire pontosan sikerül a $G_{cél} = 0,03 G_0$ vezetőképességet beállítani. Párhuzamosan mérjük a piezofeszültséget is (b), azaz mennyit kell mozgatni az elektródákat a rés szélességének stabilan tartásához. A piezofeszültséget az (a) panelen ismertett kalibráció alapján váltjuk át a bal oldali tengelyen feltüntetett elmozdulássá. A mérőrendszer infralámpával történő minimális szintű melegítése a hőtágulás miatt $\sim 350 \text{ \AA}$ elmozdulást eredményez, amit a szabályozó áramkör tökéletesen kompenzál, azaz a rés szélessége 10^{-10} m-nél kevesebbet változik.

ritmusára szabályozunk. Egy egyszerű algoritmus szerint a piezofeszültséget

$$\frac{dU}{dt} = P(\log(G) - \log(G_{cél}))$$

függvény szerint változtatjuk, azaz az aktuális érték minél jobban eltér a célba vett értéktől, annál gyorsabban haladunk a célérték felé. Megmutatható, hogy ilyen szabályozás mellett a rés szélessége könnyen oszcillálni kezd, így finomítani kell az algorit-

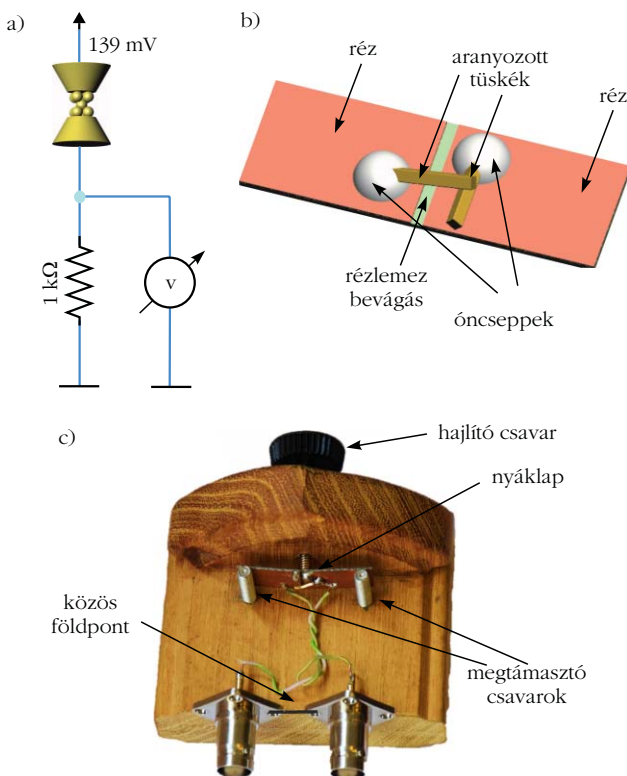
muson. Precízebb szabályozást érhetünk el, ha a fenti proporcionális tag mellett egy integrális tagot is bevezetünk, azaz

$$\frac{dU}{dt} = P(\log(G(\tau)) - \log(G_{cél})) + I \int_0^t \log(G(\tau)) - \log(G_{cél}) d\tau. \quad (2)$$

A P és az I együtthatók a szabályozó algoritmus hangolható paraméterei, ezek megfelelő beállításával optimalizálható a szabályozás.

A két elektróda közötti atomi szélességű rés stabilizálását a törőkontaktus-elrendezésben is megvalósíthatjuk a mérésvezérlő programba beépített szabályozó algoritmus segítségével. Egy ilyen mérést mutat az *5.b-c ábra*, az alagúttartományba eső $G_{cél} = 0,03 G_0$ célérték mellett. Az *5.c ábra* a vezetőképesség időbeli változását mutatja. Látható, hogy a körülbelül 150 másodperces mérés alatt a vezetőképesség egy nagyságrendnél kevesebbet változik, azaz a két elektróda közötti rés szélességét 1 Å-nél pontosabban sikerült stabilizálni. Mindeközben megnézhetjük a piezofeszültség változását is (b), amit az (a) panelen bemutatott kalibráció alapján átválthatunk elmozdulássá. Látszik, hogy miközben az elektródák távolságát 10^{-10} m-es pontossággal stabilizáljuk, ennél három nagyságrenddel nagyobb távolságskálán kell mozgatnunk

6. ábra. a) A vezetőképesség lépcsőzetes változása egy egyszerű kapcsolással és egy megfelelően gyors digitális oszcilloszkóppal is kimérhető. b) A laprugóra rögzített aranyszálat helyettesíthetjük két aranyozott tűskével. c) A hajlító eszköz egy kis házi barkácsolással is megvalósítható.

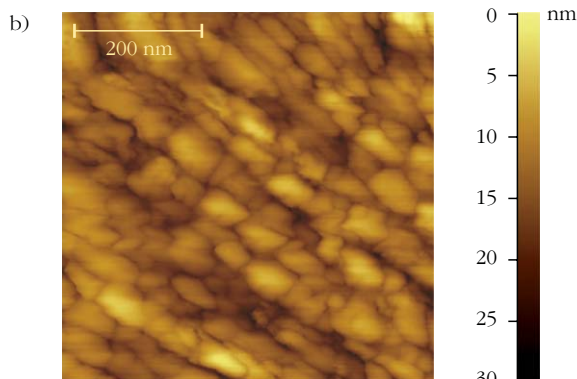
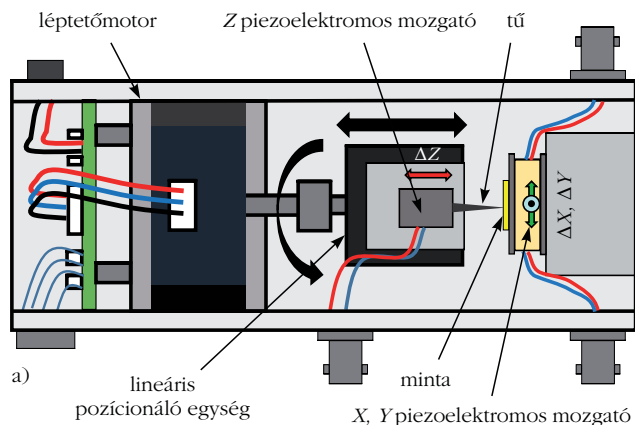


az elektródákat ahhoz, hogy a környezeti hatásokat kompenzáljuk. A (b) panelen az elektródák hirtelen eltávolodásakor a hőtágulás szerepét szimuláltuk: a mérőrendszert mintegy fél méter távolságból egy infralámpa segítségével melegítettük, amelynek hatására 350 Å elmozdulást tapasztaltunk. Később a lámpa kikapcsolása után a rendszer nagyjából az eredeti állapotba állt vissza. Összehasonlításként 10^{-5} K^{-1} nagyságú lineáris hőtágulási együtthatóval számolva egy 1 mm hosszúságú drótdarab hőmérsékletének egy fokos növekedése 100 Å nagyságrendű megnyúlásnak felel meg, ami két szomszédos atom távolságának mintegy ötvenszerese, azaz az atomok skáláján mérve valóban egészen csekély hőmérséklet-változás is drasztikus elmozdulást okoz. Ezt tapasztaljuk is a kísérlet közben, zárt ajtók és ablakok mellett lényegesen stabilabb a mérőrendszer, mint ha egy ablak kinyitásával huzatot csinálunk.

A kísérlet egyszerűbb elvégzése

Az aranyvezeték szakításánál jelentkező lépcsőzetes vezetőképesség-változást a fent ismertetettől sokkal egyszerűbb elrendezésben is lehet vizsgálni. A laprugó befogásához fából vagy fémből házilag is barkácsolhatunk egy eszközt. A laprugó megtámasztásához például használhatunk egy falapba rögzítve két menetes csavart, a hajlítóhoz pedig egy megfelelően rögzített csavaranyában tekerhető finom menetű csavart (*6.c ábra*). A léptetőmotor és a piezoelektromos mozgató kihagyható az elrendezésből, cserébe viszont szükség van egy megfelelően gyors (legalább 10 MHz-es sávszélességű) digitális oszcilloszkópra, amellyel a vezetőképesség változása közvetlenül a szétszakadás előtt felvehető. Ha nem akarunk áramerősítőt építeni, akkor a *6.a ábrán* található egyszerű kapcsolást is alkalmazhatjuk. Egy 9 V-os elemből egy 1 kΩ-os feszültségosztóként használt potméter segítségével 139 mV feszültséget állítunk elő. Erre a meghajtófeszültségre kötjük a fémzálat, illetve azzal sorba kötve egy 1 kΩ-os ellenállást. Ez utóbbin az oszcilloszkóppal mérjük a feszültséget. A szakítás előtt a fémzál ellenállása kicsi ($\ll 1 \text{ k}\Omega$), így a teljes meghajtó feszültség az 1 kΩ-os ellenálláson esik. Az egyatomos kontaktus kialakulásakor a fémzál ellenállása mintegy 12,9 kΩ, így az 1 kΩ-os ellenálláson 10 mV feszültség esik. Az oszcilloszkópot például 30 mV-os csökkenő feszültségre triggerelve, single shot üzemmódot, és 5-10 μs -os időalapot használva *elcsíphető* az a rövid időintervallum, amikor a páratomos kontaktus, illetve az azt jelző vezetőképesség-platók kialakulnak. Ha 10 mV feszültségnél markáns lépcsőt látunk, akkor a kísérlet sikerült.

Az aranyvezeték két aranyozott bevonatú, elektronikai áramköröknél használt tűskével helyettesíthető. Ezeket forrasztópáka segítségével a *6.b ábrának* megfelelően egy nyáklemezre kell felforrasztani, amelynek részfelületét előzetesen kettévágtuk, hogy a két rész elektromosan ne legyen kontaktusban. Ez-



7. ábra. Demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkóp vázlata és a mikroszkóppal aranyfelületről felvett kép. Forrás: Sánta Botond diplomamunka, BME Fizika Tanszék, 2016.

után egy laposfogó segítségével összenyomjuk a két fémtüskét, hogy a nyáklemez hajlítatlan állapotában összeérjenek. A mintát a hajlító szerkezetbe helyezve és az mérőáramkört összeállítva megmérhetjük a vezetőképesség-lépcsőket. Ezzel az egyszerű elrendezéssel – természetesen – az alagútáram távolságfüggése és az alagútmikroszkópban használt szabályozás nem demonstrálható.

Demonstrációs pásztázó alagútmikroszkóp egy hasonló elrendezésben

A Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak szakkör résztvevői a fent ismertetett kísérletek önálló elvégzése után egy demonstrációs célú pásztázó alagútmikroszkóppal is megismerkedhetnek. Az alagútmikrosz-

kóp nagyon hasonlít a törőkontaktus mérőeszközre: ugyanazt a fémházat, léptetőmotort és lineáris pozicionálót használjuk, csak a laprugó helyett egy X és Y irányban mozgatható fémminta és egy Z irányban mozgatható tű található benne (7.a ábra). A vezérlést a nyílt forráskódú *GXSM* (Gnome X Scanning Microscopy) szoftver valósítja meg a *SoftDb* cég erre a célra kifejlesztett vezérlőelektronikája segítségével (*SoftDb MK2-A810*). A 7.b ábra egy aranyfelület pásztázása közben felvett képet mutat, amelyen jól kivehetők az aranyfelületre jellemző néhányszor 10 nm átmérőjű szemcsék.

Kitekintés

Atomi méretű nanovezetékek segítségével a jelenlegi félvezető tranzistoroknál lényegesen kisebb elektronikai építőelemek hozhatók létre. A BME Fizika Tanszék Nanoelektronika laboratóriumában [3] például olyan rendszereket tanulmányozunk, amelyekben pozitív feszültség hatására kialakul egy nanovezeték a két elektróda között, negatív feszültséggel viszont megszakíthatjuk ezt a vezetéket. Ez gyakorlatilag egy memóriaelem, amivel pár nanométeres skálán tárolhatunk információt. Ezen kívül az atomi méretű kontaktusokat arra is használhatjuk, hogy egyedi molekulák elektromos vezetési tulajdonságait tanulmányozzuk. Miután szétszakad a kontaktus, egy olyan keskeny nanorés jön létre, amihez a megfelelő kémiai csoportokkal rendelkező parányi molekulák kötődni szeretnek. Így a két elektróda között akár egy egyetlen molekulából álló híd hozhatunk létre. Egyedi molekulából készített nanoáramkörök vizsgálatával a nanofizikán belül egy egész tudományterület, az úgynevezett molekuláris elektronika foglalkozik. A kutatások fő célja, hogy a jelenleg több százezer atomból álló tranzistorokat egyedi molekulákból felépülő elektronikai eszközök váltsák fel.

Irodalom

1. Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak szakkör, Mérések atomi méretskálán. http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Kari_programok_kozepiskolasoknak
2. Fizipédia, Nanofizika tudásbázis, Transzport nanovezetékekben: Landauer-formula, vezetőképesség-kvantálás. http://fizipedia.bme.hu/index.php/Nanofizika_tudasbazis
3. BME Fizika Tanszék Nanoelektronika Kutatócsoport. <http://nanoelectronics.physics.bme.hu>



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**