

## A téremissziós és a térion-mikroszkópok feltalálója

A katódsugárcsőben általában felizzított fémszálból lépnek ki azok az elektronok, amelyekből létrejön a katódsugár. Ez az elektronnyaláb atomi mértékkel mérve meglehetősen széles és inhomogén. További ügyeskedéssel tehető többé-kevésbé keskeny és homogénné, hogy alkalmas legyen eltérítésre (oszilloszkóp), továbbá modulálásra (televízió), valamint tárgyak ellenőrzött besugárzására (elektronmikroszkóp).

1936-ban a berlini műegyetemen a Nobel-díjas *Gustav Hertz* (1887–1975) egyik doktoranduszának eszébe jutott, hogy magáról a katódsugarat kibocsátó fémről is lehetne információhoz jutni, ha elég kis felületről lépne ki az elektronok, mégpedig a fém kristályszerkezete által meghatározott, de legalábbis befolyásolt irányokban. Ehhez hideg katódra lenne szükség, mert a termikus elektronok már semmi információval nem rendelkeznek arról a helyről, ahonnan kiléptek. Hidegkatódból viszont hogy lehet kiszívni az elektronokat? Rendkívül erős elektromos térrel. Tű alakú katódra van tehát szükség, két okból is: egyrészt, hogy kis felületről (a tű hegyéről) lépjenek ki az elektronok, másrészt az elektromos csúcshatás miatt itt alakulhat ki nagy elektromos térerősség.

A doktorandusz, akinek ezt sikerült gyakorlatilag is megvalósítania, *Erwin W. Müller* (1911–1977) volt. A tűhegyes katóddal rendelkező, nagyvákuumú, hidegemissziós katódsugárcsővet azután elnevezték téremissziós mikroszkópnak (*1. ábra*). Tájékoztató adatok: a tű hegyének „görbületi sugara” 100 nm nagyságrendű, feszültsége a fluoreszcens ernyőhöz képest néhány kV. Így a térerősség a csúcsonál 10 milliárd V/m nagyságrendű. Ennyi már elég ahhoz, hogy elektronok léphessenek ki a fém felületi kristályszerkezetéből és a kristálysíkok elhelyezkedéséről nyújtsanak információt az ernyőn. A nagyítás százszázas nagyságrendű, a feloldási határ 2 nm. Erwin Müller wolframcsúccsal dolgozott, de más magas olvadáspontú fémek (Mo, Pt, Ir) is alkalmasak erre a vizsgálatra.

Ma már a német Leybold cég fizikai taneszközként gyárt téremissziós mikroszkópot, hazai egyetemeken is találkozhatunk ezzel, mint demonstrációs eszközzel.

Visszatérve a feltalálóhoz, Hertz behozta a Siemenshez, ahol ő maga is dolgozott. Itt ismerkedett meg Müller *Ruskával*. Kettejük versengése az elektronmikroszkópia fejlődése szempontjából rendkívül hasznosnak bizonyult. A második világháború alatt Müller a Stabílovolt Társaságnál dolgozott, családjával együtt szerencsésen túlélte még Drezda bombázását

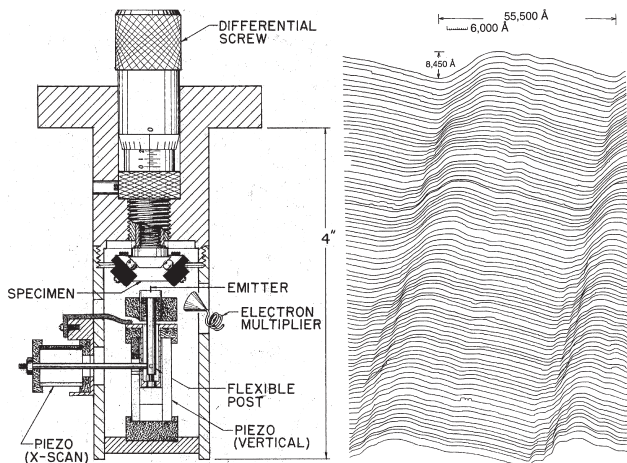
is. A háború után viszont csaknem éhen haltak, míg végül 1947-től újra Berlinben kapott állást az elektrokémiai intézetben. Itt találta fel és készítette el a térion-mikroszkóp prototípusát 1951-ben.

A térion-mikroszkópban a tű pozitív feszültségen van az ernyőhöz képest. A mikroszkóp belsejében már nem nagyvákuum van, hanem kis nyomású, semleges gáz, leggyakrabban hidrogén, hélium vagy neon. A gázmolekulák véletlenszerűen ütköznek a fémcsúccsal, ahol leszakadhat róluk egy elektron és így pozitív ionná válnak. A pozitív töltésű csúcs a pozitív ionokat eltaszítja, s ezek a foszfor-ernyőbe csapódva felvillanásokkal jelzik kiindulási helyüket. A csúcson az ernyőn kapható kép nagyítása milliószoros, feloldási határa a csúcs hőmérsékletét eléggé lecsökkentve 0,25 nm-re szorítható le. Ezt az eredményt azonban már nem Berlinben érte el Erwin Müller, hanem a Pennsylvaniai Állami Egyetemen 1955-ben, ugyanis 1952-ben családjával együtt kivándorolt Amerikába. Igazából itt tudta felcsillantani nemcsak kutatói, hanem tanári erényeit is: az egyetemen kialakított kutató laboratóriumában számos ifjú tehetséget karolt fel és indított el eredményes kutatói pályán. Ezt az 1955-ös sikeres kísérletet is egyik PhD tanítványa, az indiából érkezett *Kanwar Babadur* (1925–) segítségével hajtotta végre. A hűtés – folyékony nitrogénnel – Bahadur javaslata volt. 1967-ben Müller tovább javította térion-mikroszkópja teljesítményét, amikor sikerült összekapcsolnia egy alkalmas tömegspektrométerrel. Az új eszköz neve atomszondás térion-mikroszkóp (Atom Probe Field Ion Microscope) lett. A számítógéppel összekapcsolt bonyolult berendezéssel nemcsak észlelni, de azonosítani is lehetett egy-egy

1. ábra. Erwin W. Müller a téremissziós mikroszkóppal.



A tanulmány az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával készült, a támogatási szerződés száma TAMOP 4.2.1./B-09/1/KMR-2010-0003.



2. ábra. Russel D. Young topografijere és az első felvett mikroszkóp kép az eredeti, 1972-ben megjelent cikkből.

atomot. Megtervezésében és kivitelezésében Erwin Müller sok tanítványa vett részt, végülis *John Panitz* foglalta össze a legfontosabb első eredményeket doktori munkájában.

A mikrovilág felfedezői között Erwin Mülleré a dicsőség, hogy elsőnek látott meg mikroszkópjával egyes, különálló atomokat. A 20. század sok tudósát, felfedezőjét hajtotta a vágy, hogy első lehessen ebben a versenyben – láttuk, *Gábor Dénes* számára is milyen komoly motivációt jelentett fiatalkori elhatározása: elvezette a holográfiához és ezen keresztül a Nobel-díjhoz.

Vajon Erwin Müller miért nem kapott Nobel-díjat? Mikroszkópért az utolsó Nobel-díjat 1953-ban adták, elektronmikroszkópért pedig a nyolcvanas évekig senki se kapott. Optikában a lézer volt az igazi újdonság, ennek kapcsán adtak ki 1964-ben (*Townes, Baszov, Prohorov*), 1966-ban (*Kastler*), és még 1971-ben is (*Gábor Dénes*) Nobel-díjakat. Erwin Müller 1976-ig aktívan kutatott és tanított. 1952-ben Berlinben Gauss-medállal tüntették ki, ehhez *Max von Laue* mondott laudációt. Amerikában 1962-ben nyerte el az állampolgárságot, 1972-ben kapta meg az Amerikai Fizikai Társaság *Davisson–Germer*-díját. 1977-ben a Fehér Házban *Jimmy Carter* elnök a „National Medal of Science” rangos kitüntetést sajnos már csak Erwin Müller lányának nyújthatta át: édesapja néhány hónappal előtte váratlanul elhunyt.

## A pásztázó tűszondás mikroszkópok feltalálói

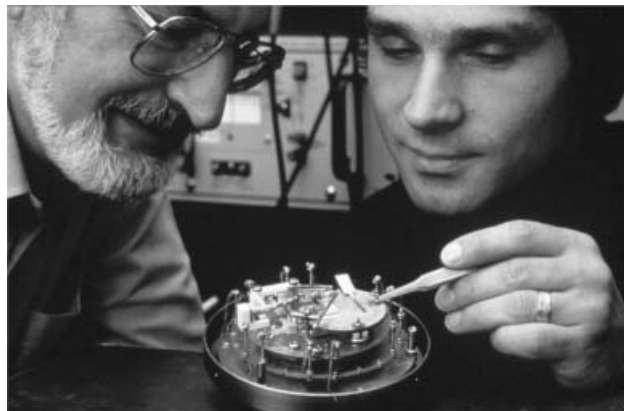
*Russel D. Young* (1931–) ugyancsak a Pennsylvaniai Állami Egyetemen volt PhD hallgató és – mondanunk sem kell – Erwin Müller tanítványa. A fokozat 1959-ben történt megszerzése után Erwin Müller továbbra is ott tartotta, kutatóként foglalkoztatta laboratóriumában. Megépített a laboratórium számára egy nagyfelbontású energiaanalizátort, mérte a téremisszió során kilépő elektronok energiaeloszlását, és aktívan közreműködött az alacsony hőmérsékletű térion-mikroszkóp kifejlesztésében is. 1961-től a National Bureau of Standards volt munkahelye, akár csak *Bay*

*Zoltánnak* ebben az időben. *Russel D. Young* egy olyan kutatási projektben vett részt, ahol különböző anyagok felületeinek tanulmányozása volt a feladata. Erre a célra találta ki és építette meg pásztázó tűszondás készülékét, amelynek a „Topografijer” nevet adta (2. ábra).

Az ötlet elég kézenfekvő, addig mégsem jutott eszébe másnak (hacsak nem *Erwin Müllernek*). Egy téremissziós elektronmikroszkópban a fémtűből kilépő elektronokat most nem engedik messzire repülni, hanem közvetlenül a tű közelében helyezik el a mintát, amibe becsapódik az elektronsugár. Oldalt, akár csak a pásztázó elektronmikroszkópnál, egy szekunderelektron-sokszorozó fogja fel és erősíti tovább az elektronsugár által bombázott területről jövő, a szekunder elektronok által szállított információt. A lényeges eltérés a pásztázó elektronmikroszkóptól az, hogy most nem a katódból (jelen esetben a tűből) kilépő elektronsugarat térítik el és vezetik végig soronként a mintán, hanem magát a tűt mozgatják a minta felett, előírt módon, egymás utáni sorokban. Ezt a finom mozgást piezoelektromos úton oldják meg, mind  $x$ , mind  $y$ , mind  $z$  irányban. *Russel D. Young* méréseinél a topografijer nyújtotta információt szinkronizált X-Y író jelenítette meg. A feloldási határ 0,3 nm lett volna, de a kiszűrhetetlen vibrációk miatt ezt mégse lehetett elérni. 1971-ben befejeződött a projekt, ekkor publikálta *Young* az elért eredményeket. Még tíz évig dolgozott a cégnél, részben kutatói, részben adminisztratív munkakörben. Abban az évben ment nyugdíjba, amikor Európában két fizikusnak sikerült minőségi javulást elérnie a pásztázó tűszondás technikában.

1981-ben *Heinrich Rohrer* (1933–) svájci és *Gerd Binnig* (1947–) német fizikus három évi közös kísérletezés után az IBM Zürich melletti kutató laboratóriumában egy olyan pásztázó tűszondás mikroszkópot hozott létre, amelyben elvileg új utat választottak a minta domborzatának letapogatására (3. ábra). A tűt olyan közel vezették a minta fémes felületéhez, hogy a tű hegye (szerencsés esetben egyetlen atom) és a minta felületének atomjai között úgynevezett „alagútáram” alakulhasson ki. Klasszikusan tekintve nem ér hozzá a tű a mintához, de olyan közel van hozzá,

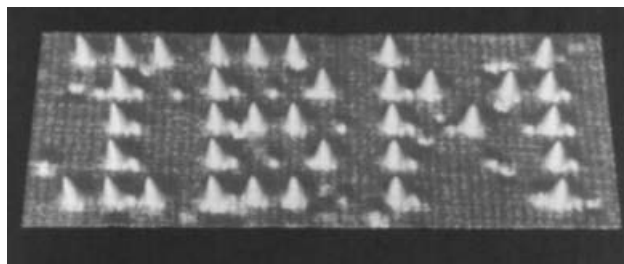
3. ábra. *Heinrich Rohrer* és *Gerd Binnig* a Nobel-díjat érő találmánnyal, a pásztázó alagútmikroszkóppal.



hogy a kvantummechanikai alagúteffektusnak megfelelően átugrálnak elektronok a mintáról a tűre és viszont. Ha elektromos tér van jelen (a tű negatívabb a mintánál) akkor az elektron átugrása a tűről a mintára valószínűbb, mint fordítva, kialakul az alagútáram. Ez az áram rendkívül érzékeny a minta és a tű távolságára, 0,1 nm-es távolságváltozás esetén tízszeresére nőhet, vagy tizedére csökkenhet. Azt is mondhatjuk, hogy egy nagyságrenddel érzékenyebbé tették Young topografinerét és alkalmas felfüggesztéssel nagyrészt megoldották a vibráció problémáját is.

Heinrich Rohrer Zürichben az ETH-n, a zürichi műegyetemen végzett 1951-ben, *Wolfgang Pauli* (1900–1958) és *Paul Scherrer* (1890–1969) tanítványa volt. Doktori munkájaként szupravezetőkben fellépő kicsiny hosszváltozásokat kellett mérnie – már ekkor megismerkedett a mérésgyilkos vibráció problémájával. 1963-ban kezdett dolgozni az IBM zürichi laboratóriumában, ahol többek között antiferromágnességgel és kritikus jelenségekkel foglalkozott 1978-ig, egy új, fiatal munkatárs belépéséig. Gerd Binnig sokáig a zenei és a fizikusi pálya között ingadozott; szépen hegedült és beat együttesekben gitározott. Sajat bevallása szerint egyetemi tanulmányai sem hagytak mély nyomot benne, csak azt élvezte igazán, amikor diplomamunkáján dolgozott. 31 évesen, doktoriának megvédése után lépett be az IBM laboratóriumába, ahol kedvező munkahelyi légkörre talált és kellemes barátokra lelt Rohrer személyében. Közös munkájuk eredménye, amit ők pásztázó alagútmikroszkópnak (Scanning Tunneling Microscope) neveztek el, méreteit tekintve nem nagy (elférne akármelyik feltaláló tenyerén), számítógépekkel összekapcsolt működését, teljesítményét tekintve viszont villámgyorsan kivívta a szakértők elismerését.

Gerd Binnig munkatársaival együtt 1986-ra kifejlesztette a pásztázó tűszondás mikroszkópok kereskedelmi forgalomban kapható jelenlegi legjobb (és nem



4. ábra. IBM felirat 35 xenonatomból, atomerő mikroszkóppal felvéve.

is a legdrágább) változatát, az atomerő mikroszkópot (Atomic Force Microscope). Ezzel már nemcsak elektromosan vezető anyagok felülete vizsgálható. Nem kell hozzá nagyvákuum (olykor még kicsi sem), biológiai makromolekulák, akár még élőlények is vizsgálhatók vele. Felbontása a legjobb transzmissziós elektronmikroszkópokéval vetekszik, az egyatomos tűcsúcsok esetén 0,1 nm. Egyetlen hátránya, hogy lassabban dolgozik, akár 5 percre is szükség lehet egyetlen kép elkészítéséhez. Binnigék ahhoz is értettek, hogyan szemléltessék találmányuk teljesítő képességét: tűszondájuk segítségével 35 xenonatomból kirakták az IBM betűket egy atomsíkra, majd ezt lefényképezték és publikálták (4. ábra).

Rohrer és Binnig a Hewlett-Packard-díj és más kiüntetések után 1986-ban megkapták a fizikai Nobel-díjat. Pontosabban csak a felét, a másik felét az akkor már 80 éves Ernst Ruskának ítélte a svéd Nobel-díj bizottság. Az elektronmikroszkóp több mint fél évszázados történetében ez volt az első alkalom, hogy Nobel-díjjal tüntették ki a feltalálókat. Ha ezt Erwin Müller megérhette volna!

Szolgálja ez a cikk is a róla történő méltó megemlékezést, hiszen idén ünnepelhetjük nemcsak az elektronmikroszkópért adott Nobel-díj 25 éves évfordulóját, de június 13-án lenne Erwin W. Müller 100. születésnapja is.

## VÉLEMÉNYEK

# ENERGIA, CIVILIZÁCIÓ, KULTÚRA, TÚLÉLÉS – I.

Szergényi István

az ENSZ EGB Energia Bizottságának volt elnöke

Hazánk a világ energiatermelésében és -felhasználásában egyaránt csekély mértékben vesz részt, a globális folyamatok viszont nagy hatással vannak rá. Rövid

összefoglalónk civilizáció(in)k energiafüggősége miatt az energiával kapcsolatos kérdések sokoldalú megközelítésére törekszünk.

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága az 1972-ben meghirdetett VÉLEMÉNYEK sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapján „a *Fizikai Szemle* feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatásra és fizika oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, várjuk a magyar fizikusok leveleit.