

# fizikai szemle

„A szerencsét észre is kell venni.  
S ha látod, merni kell dönteni.”

Gyulai József



Pásztázószondás módszerek  
Elektronmikroszkópia  
Humor és fizika

2024/3

nka

# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, a Kulturális és Innovációs Minisztérium, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:  
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:  
Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Olasz szerkesztő:  
Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő:  
Hock Gábor

A folyóirat e-mail címe:  
fsz\_szerkesztok@elft.hu  
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:  
<http://fizikaiszemle.elft.hu>



A címlapon:  
Gyulai József  
(1933–2021)

## TARTALOM

### GYULAI JÓZSEF ÖRÖKSÉGE – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztők: Biró László Péter és Pécz Béla

Biró László Péter, Pécz Béla: Gyulai József öröksége a funkcionális anyagok tudományában 73

Biró László Péter, Tapasztó Levente, Nemes-Incze Péter: Pásztázószondás módszerek az MFA-ban 74

A pásztázószondás vizsgálati módszerek MFA-s bevezetését és alkalmazási területeit járja körül az írás.

Petrik Péter, Fried Miklós, Lohner Tivadar: Optikai módszerek az MFA-ban Az ellipszometria és más optikai módszerek első hatvan éve az MFA-ban. 80

Lábár János, Pécz Béla: Transzmissziós elektronmikroszkópia az MFA-ban 84

A cikk leírja az MFA-ban üzembe helyezett transzmissziós elektronmikroszkópokat, melyekből a legújabb egy gömbhiba-korrigált TEM/STEM 1 angström alatti felbontással. Arra is rámutat, hogy az analitikai lehetőségek miatt ma már egy elektronmikroszkóp sokkal több, mint a képek, felvételek készítésére alkalmas eszköz.

Battistig Gábor: Az ionsugaras adalékolás és analitika alkalmazása a félvezető-technológiában, avagy, Gyulai József munkásságának hatása a KFKI-ban és utódintézményeiben 88

Rövid áttekintés, hogy hogyan indultak a hazai félvezető implantációs kutatások Gyulai Józseffel, és hová jutott azóta a mikrotechnológiai kutatás a KFKI utódintézményeiben.

A címlap háttérmentázata: gyémánt dumbbellek, a „súlyzók”-at alkotó két szénatom távolsága 0,089 nm

### REFLEKTORFÉNYBEN

Ferencz Kárpát: Emlékeim Krausz Ferenc újáról a Nobel-díjjal – II. rész 92

### A FIZIKA TANÍTÁSA

Beszeda Imre, Stonawski Tamás, Mákos Annamária: A humor a fizikaoktatás szolgálatában 96

Fürjes Bálint, Dóra Balázs, Simon Ferenc: Az elektromágneses sugárzás távolhatása, avagy mire jó a Poynting-vektor, illetve tudunk-e a fénynél gyorsabban haladó jeleket előállítani? 102

### MEGEMLEKEZÉS

Härtlein Károly, Dallos Györgyi, Lázi Márta, Füstöss László: Orosz László emlékezete (1947–2023) 107

L. P. Biró, B. Pécz: The legacy of József Gyulai in the science of functional materials

L. P. Biró, L. Tapasztó, P. Nemes-Incze: Scanning probe methods at MFA

P. Petrik, M. Fried, T. Lohner: Optical methods at MFA

J. Lábár, B. Pécz: Transmission electron microscopy at MFA

G. Battistig: The application of ion beam doping and analytics in semiconductor technology or the impact of József Gyulai's work at KFKI and its successor institutions

### IN SPOTLIGHT

K. Ferencz: My memories of Ferenc Krausz's path to the Nobel Prize – Part II

### TEACHING PHYSICS

I. Beszeda, T. Stonawski, A. Mákos: Humor in the service of physics teaching

B. Fürjes, B. Dóra, F. Simon: Telekinesis of electromagnetic radiation, or what the Poynting vector is good for, or can we produce signals traveling faster than light?

### COMMEMORATION

K. Härtlein, Gy. Dallos, M. Lázi, L. Füstöss: Remembrance of László Orosz (1947–2023)

Fizikai Szemle  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS  
INNOVÁCIÓS  
MINISZTERIUM



# GYULAI JÓZSEF ÖRÖKSÉGE A FUNKCIONÁLIS ANYAGOK TUDOMÁNYÁBAN

Gyulai professzor, akit több szempontból is joggal nevezhetünk az MFA alapító igazgatójának, 2023. augusztus 21-én töltötte volna be a 90. évét. 2021. február 12-én bekövetkezett halála súlyos veszteség az MFA kutatóközösségének és a mai modern magyar anyagtudományoknak. A *Fizikai Szemle* jelen emlékszámban kísérletet teszünk arra, hogy felidézzük annak a kivételesen eredményes kutatói és tudományszervezői pályának néhány elemét, amit Gyulai professzor magáénak mondhatott.

Gyulai Jóska – azt szerette, ha Jóskának szólítjuk – volt az első, akitől „a funkcionális anyagok tudományáról” hallottuk a múlt század 90-es éveinek elején. Jóska következetesen és kitartóan küzdött a funkcionális anyagok tudományának hazai elismertetéséért. Magyarországon az anyagtudomány sokáig a tartószerkezetek szilárdságáról, gerendákról és hidakról szólt. Az anyag szerkezetének és tulajdonságainak tudatosan megtervezett atomi szintű alakítása és kézben tartása kétségkívül Gyulai professzor nevéhez köthető.

A félvezető anyagok, és a fokozatosan rájuk épülő szórakoztatóipar, majd a számítástechnika és az információs technológiák, végül az internet és a multimédia – ahogyan ma ismerjük – döntő szerepet játszott a XX. század második felének alakításában, és meghatározzák napjainkat. Az egyre zsugorodó méretű tranzisztorok az integrált áramkörökben (IC) elképzelhetetlenek és megvalósíthatatlanok lettek volna a funkcionális anyagok tudományának hihetetlenül magas szintre emelése nélkül.

Jóska az IC-korszak és az ionimplantációs technológiák hajnalán kapcsolódott be a funkcionális anyagok kutatásába, és több területen is meghatározó volt hozzájárulása az ionos technikák kifejlesztéséhez és alkalmazásához. A Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) felbomlásával önállóvá váló Anyagtudományi Kutatóintézet (ATKI), majd a Műszaki Fizikai Kutatóintézet (MFKI) történt egyesítés utáni Műszaki Fizikai és

Anyagtudományi Intézet (MFA) igazgatójaként számos, a mai nanoméretű anyagtudományos kutatási irány elindulását és kibontakozását tette lehetővé. Jövőbe mutató víziója és a fiatal kollegák irányában megmutatkozó atyai jóindulata sikeres témák felvirágoztatására adott lehetőséget. Ezek közül tekintünk át néhányat és egyes kiemelésre érdemes eredményeiket.

Gyulai Jóska kezdeményezte az MFKI és az ATKI egyesülését, majd azt a közös intézetet, azaz az MFA igazgatójaként véghez is vitte 1998-ban. Kialakult, majd konszolidálódott a közös intézet, amelyben elkezdődtek a szén nanocsöves kutatások, megerősödtek a klasszikus félvezető területek, ionsugaras és optikai vizsgálatok. Szerencsére a közös munkák még az egyesülés előtt megkezdődtek. Az intézet mindkét fele serkentőleg hatott a másikra, és az idők folyamán a két fél egy intézetté kovácsolódott. Mára az intézetben kialakult az anyagszerkezet atomi szintű vizsgálatára és modellezésére alkalmas technikák széles köre; transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM), pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és pásztázó transzmissziós elektronmikroszkóp (STEM), fókuszált ionsugaras (FIB – ebből az első berendezést 20 éve Jóska szerezte be), illetve pásztázó alagútmikroszkóp (STM) és atomerő-mikroszkóp (AFM, SFM), továbbá spektroszkópok sora, Raman-mikroszkóp, folyadék-mikroáramlásos AFM, spektroszkópiai ellipszometria és teljes kiépítésű röntgen-fotoelektron-spektroszkópiai (XPS) térképezési funkció. Közben a félvezetőlabor is egyértelműen az új fizikai elveken alapuló érzékelők fejlesztésén dolgozik és ezek a mikrofluidikai eszközökkel együtt egyre inkább beépülnek a hazai és nemzetközi orvosi és elektronikai alkalmazásokba.

A teljesség igénye nélkül adjuk közre a következő néhány ismertetőt olyan területekről, amelyek Jóska nélkül nem fejlődhetek volna a mai szintre, és bízunk benne, hogy örökségével jól sáfárkodunk.



Prof. Dr. Biró László Péter  
az MTA rendes tagja



Prof. Dr. Pécz Béla, igazgató  
az MTA levelező tagja

# PÁSZTÁZÓSZONDÁS MÓDSZEREK AZ MFA-BAN

Biró László Péter, Tapasztó Levente, Nemes-Incze Péter  
HUN-REN EK MFA, Budapest

Gyulai professzor 2007-ben foglalta össze a *Fizikai Szemlében* gondolatait a pásztázószondás módszerekről [1].

A pásztázó alagútmikroszkóp (scanning tunneling microscope), gyakori rövidítéssel STM 1981-es publikálása után [2], szokatlanul rövid idővel, 1986-ban Gerd Binnig és Heinrich Rohrer korszakalkotó eredményét fizikai Nobel-díjjal ismerték el. Ez a gyorsaság is fémjelzi az eredmények kivételes jelentőségét, ami abban nyilvánult meg, hogy az atomok „egyenként láthatóvá váltak”. Az idézőjelek többszörösen is indokoltak, mégis igaz az előbbi állítás. A módszer kivételes felbontási képességét az alagutazási folyamat sajátosságai adják, amely egy atomi skálán hegyes tű és a leképezett minta között zajlik [3]. Röviden: a leképezett vezető minta felszíne felett piezoelektromos aktuátorokkal néhány tized nanométeres távolságra a felület domborzatát lekövető módon mozgatunk egy atomi szinten hegyes fémtűt. A tű csúcscsúcsa és a minta atomjai között kialakuló, egyetlen atomnyi szélességű, szűk alagútcatornában az elektronok hol kisebb, hol nagyobb valószínűséggel „ugorhatnak át” az elektromosan előfeszített alagútközön, ami a minta helyi minőségétől függő, mérhető alagútáramot ad.

Az, hogy egy vezetőképes minta felszínén az egyes atomok térbeli elhelyezkedése leképezhetővé vált, számos új lehetőséget nyitott a kutatók előtt – ahogy azt az eltelt negyven év ékesen bebizonyította. Ezen lehetőségek tárháza mára akkorára bővült, hogy nincs olyan összefoglaló mű, amely egyben képes lenne bemutatni az elmúlt negyven év akárcsak főbb eredményeit is. A teljesség igénye nélkül, csupán néhányat kiragadva ezen területek közül, említhető az anyagok atomi skálán történő építése, módosítása [4], félvezető heteroátmenetek atomi szintű jellemzése [5], 2D anyagok heteroátmeneteinek [6] és ultragyors folyamatainak kutatása [7], de a vizsgált terület a kémiai folyamatokon át [8], a biológiáig terjed [9].

Az STM megalkotását rövid időn belül követte az atomerő-mikroszkóp (atomic force microscope, AFM) kifejlesztése [10]. A fő motivációt az adta, hogy az AFM a nem vezető minták leképezésére is alkalmas volt. Az tette

alkalmassá az AFM-et a szigetelő minták vizsgálatára is, hogy az STM-mel ellentétben a leképezést végző tű-szon- da és a minta között nem folyik alagútáram, hanem a van der Waals-kölcsönhatás határozza meg a tű-minta kölcsönhatást. Ennek mérésére mikromegmunkálási eljárásokkal kialakított, vékony laprugón található tűt alkalmaznak. A laprugó lézeresen érzékelt deformációja méri a minta és a tű közötti kölcsönhatást. Az elmúlt évtizedekben az AFM és a belőle kialakult különféle leképezési módszerek még sokkal intenzívebb és szerteágazóbb fejlődésen mentek át, mint maga az STM. Így a Google Scholar adatbázisában csupán a 2020–2023-as időszakra rákeresve és az összefoglaló cikkekre szűkítve több mint 18500 találat az eredmény. Az aktuális tématerületek spektruma az élő anyag mechanikai tulajdonságainak vizsgálatától [11] a nanoskálán zajló elektrokémiai folyamatokon át [12] az újszerű nanopórusos anyagok jellemzéséig [13] és a sejtekben zajló folyamatokig [14] terjed.

Az STM története az MFA-ban (a továbbiakban MFA-ként utalunk az intézetre, amely 1990 és 2023 között ötször váltott nevet) 1991 nyarán kezdődött. Érdekes módon, az eszköz beszerzését két inkább elméleti kutató, Balázs Erzsébet és Kádár György kezdeményezték. A telepítéskor csúcskészüléknek számító, az RHK Technology által gyártott és 1 mikron<sup>2</sup> bepásztázásra képes STM első atomi felbontású felvételeit a kalibrációs mintának használt közel egykristályos pirolitikus grafit (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) felszínén vettük fel. Gyulai professzor fő kutatási iránya természetesen adta,



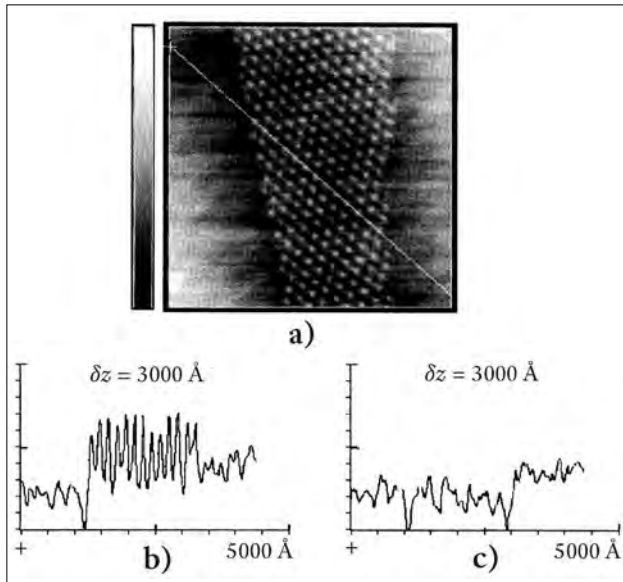
Biró László Péter a HUN-REN EK MFA Széchenyi díjas kutatóprofesszora, a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen szerzett kitüntetéses fizikusi oklevelet 1979-ben, majd a Budapesti Műszaki Egyetemen mérnökfizikusi PhD fokozatot; az MTA rendes tagja, A Magyar Mérnökakadémia és az Academia Europaea tagja. Alapító osztályvezetője volt az MFA Nanoszerkezetek osztálynak, amelyet 2015-ig vezetett. Számos hazai és nemzetközi kutatási projekt keretében járult hozzá a hazai nanotudományok kezdetéhez, elindította az MFA-ban a szén nanocsövek, a grafén és más 2D anyagok, valamint a fotonikus nanoarchitektúrák kutatását.



Tapasztó Levente a Magyar Kutatási Hálózat Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének tudományos tanácsadója és Nanoszerkezetek Laboratóriumának vezetője. A Junior Prima díjjal kitüntetett Lendület- és az ERC-ösztöndíjas kutatócsoport vezetője. Fizikusi diplomát a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen, PhD fokozatot az ELTE Fizika Doktori Iskolájában szerzett. 2023 óta az MTA doktora. Kutatási területe a nanoskálájú anyagtudomány, azon belül a kétdimenziós anyagok kutatása.

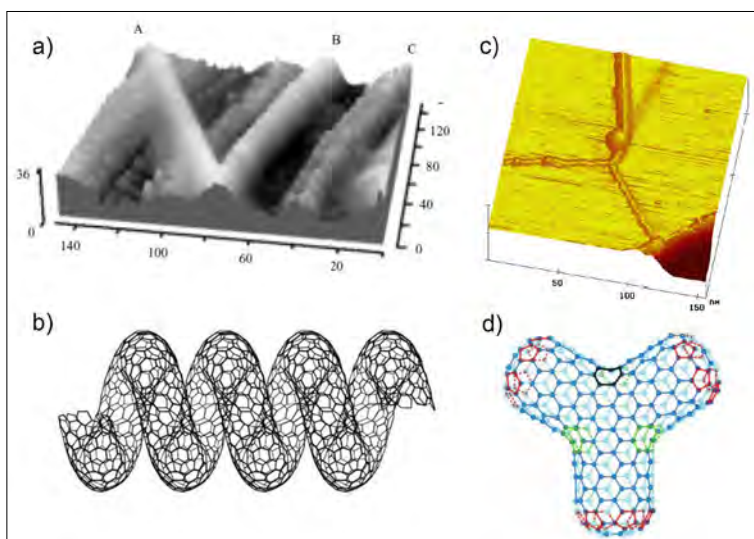


Nemes-Incze Péter 2013-ban doktorált az ELTE-n Biró László Péter témavezetése alatt. Munkája során grafén nanoszerkezetek előállítására összpontosított, illetve ezek vizsgálatára atomi skálán pásztázó alagútmikroszkópiával. Három évet töltött posztdoktori kutatóként Markus Morgenstern csoportjában az RWTH Aachenben, ahol a grafénben megfigyelhető mechanikai deformációkat és kvantum-pötty-fizikát, valamint más 2D anyagokat vizsgált STM segítségével. 2017-ben visszatért Budapestre és saját kutatócsoportját alapította az Energiatudományi Kutatóközpontban egy Lendület-projektnek köszönhetően.



1. ábra. A 215 MeV energiára gyorsított Ne-ionokkal besugárzott HOPG felszínén megfigyelt moiré-szuperstruktúra. (a) Szürke skálájú topográfiai STM-felvétel, a szürke skálának megfelelő magasságtartomány 0,38 nm; (b) vonalmetszet az (a)-ban látható, a topográfiai maximumokon áthaladó vonal mentén; (c) vonalmetszet két maximumsor között párhuzamosan a (b) vonalmetszettel. (Forrás: [15])

hogy a későbbiekben gyorsított ionokkal besugárzott felületeket vizsgáltunk. Az első publikáció 1995-ben jelent meg a Physical Review B-ben a nagy energiájú, 215 MeV energiára gyorsított Ne-ionokkal besugárzott HOPG felszínén megfigyelt nanostruktúráról [15]. Háromféle, jellegében erősen eltérő nanoszerkezetet figyeltünk meg: a) a kis energiájú kilökött céltárgyatomból dominánsan a nukleáris fékeződés tartományában okozott hibákat, b) olyan elnyújtott kiemelkedésekkel övezett krátereket, amelyeket a céltárgy felszínével nagy szöget bezáró pályán haladó, nagy energiájú (ez a dominánsan elektronikus fékeződés energiatarományára)



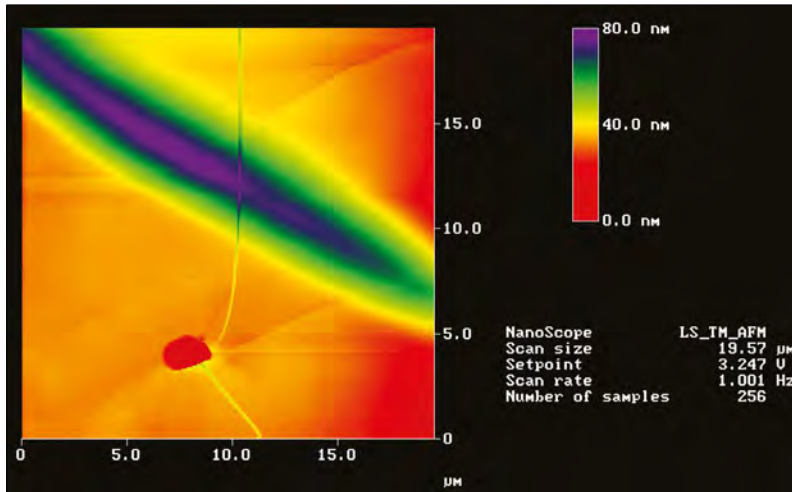
2. ábra. STM-felvételek spirálrugószerűen feltekert szén nanocsövekről (a); és a megfelelő szerkezeti modell (b). Szén nanocsövek Y elágazásáról készült STM-felvétel (c) és egy Y elágazás elvi szerkezeti modellje (d). (Források (a) és (b): [17]; (c) és (d): [20])

kilökött céltárgyatomból okoztak, és c) olyan atomi léptékű, moiréjellegű szuperstruktúrát mutató nyomokat, amelyeket a céltárgy felszínével párhuzamosan, néhány atomi réteg mélységben haladó kilökött céltárgyatomból okoztak (1. ábra). Látható a vonalmetszetekből, hogy a maximumok közötti távolság mintegy nyolcvanszor nagyobb, mint 2,4 Å, a grafitra jellemző atomi maximumok távolsága.

1996-tól az MFA-ban folyó, STM-re alapuló kutatások fókuszába a szén nanocsövek kutatása került, szoros együttműködésben a belgiumi Namuri Egyetem (Université de Namur) kutatóival. Elsőként sikerült megmutatni, hogy katalitikus úton is előállíthatók egyfalú (egy atomi rétegből álló) szén nanocsövek [16]. A későbbiekben számos, különleges formájú szén nanocső-alakzat, úgymint a szén nanocső-spirálok, és a szén nanocsövek Y elágazásai kerültek az MFA-ban folyó STM-munka fő témái közé [17–20] (2. ábra).

Az első AFM-felvételeket 1996-ban Erlangenben készítettük az Institute für Integrierte Schaltungenban. A lehetőség Gyulai professzor és Ryssel professzor – aki az IIS igazgatója volt – évtizedeken átívelő barátságának volt köszönhető. A minták nagy energiájú ionokkal besugárzott kristályos anyagok voltak, HOPG, csillám (muszkovit) és Si. Mivel a szokványos, felületre merőleges besugárzási geometria helyett elsőként alkalmaztunk újszerű, a minta felszínével párhuzamos besugárzást, számos új alakzatot sikerült leképezni, amit korábban még sohasem: az ionok behatolási mélységének tartományában kialakuló nukleáris fékeződési kaszkádokat [21] és a Si-kristályban a különböző fékeződési mechanizmusoknak megfelelő tartományokban kialakuló jellegzetes hibákat [22]. Végül – meglepetésünkre – a nagy energiájú ionokkal besugárzott HOPG-mintákon is megtaláltuk a szén nanocsöveket [23, 24]. Ezek a szén nanocsövek a céltárgy felszínén a nagy energiájú kilökött céltárgyatomból által keltett porlasztási kráterekből kilépő, gerjesztett állapotú szénatomokat tartalmazó felhőből kondenzálódnak, mégpedig úgy, hogy legalább egyik végük le van horgonyozva (3. ábra).

2004 után is a szén maradt a kutatások fókuszában, de ez már a grafén és a 2D anyagok kora volt. Az első atomi vékony (kétdimenziós – 2D) kristály, a grafén felfedezése után szinte azonnal a szilárdtestfizikai és anyagtudományi kutatások középpontjába került – elsősorban egyedülálló anyagi tulajdonságainak és különleges elektronszerkezetének köszönhetően. A pásztázószondás módszerek különösen jól alkalmazhatók a grafén és általában a 2D kristályok vizsgálatára, hiszen az anyagok felületét képezik le, és ebben az esetben a teljes kristály felületi atomokból áll, vagyis teljes egészében hozzáférhető a pásztázószondás módszerek számára. Ez egyedülálló lehetőséget kínál az



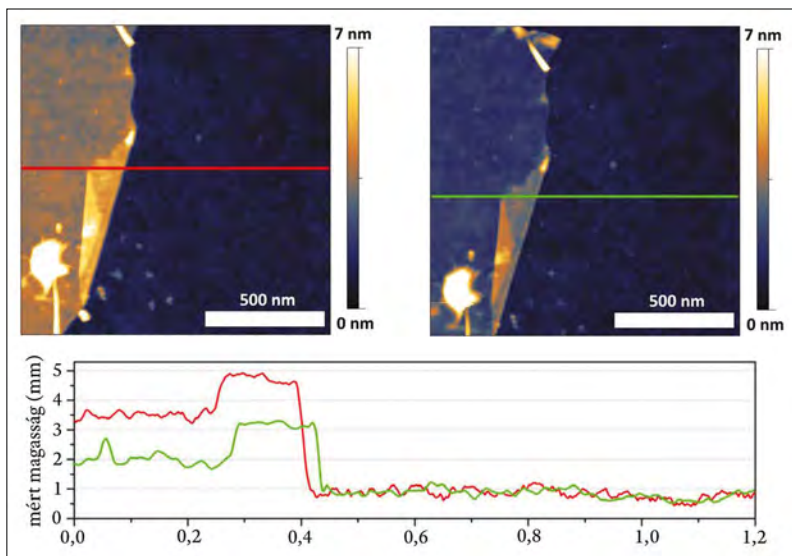
3. ábra. 156 MeV energiájú Xe-ionokkal besugárzott HOPG céltárgy felszínén keletkezett porlódási kráterről készült topográfiai AFM-felvétel. A kráter szájától induló két világosabb színű fonálszerű alakzat szén nanocső, amelyek a kráterből kiporlódott szénatomokból kondenzálódtak. Egyikük áthalad a grafít egy felületi gyűrődésén, de látható a színkontrasztból, hogy nem követi tökéletesen a gyűrődést

anyagokban végbemenő jelenségek részletesebb tanulmányozására, hiszen szinte minden folyamat a felületen, a „szemünk előtt” játszódik le, nem mélyen elrejtve a tömbi anyag belsejében. Az egyik sokat vitatott kérdés a szilíciumoxid hordozón található grafén vastagságát illetően – ha jobban belegondolunk, nem is annyira magától értetődő, mit is értünk egy egyetlen atom vastagságú lemez vastagsága alatt – az MFA-ban Nemes-Incze Péter oldotta meg [25].

Az a tény, hogy a pásztázószondás módszerek (AFM, STM) már fejlettek voltak a grafénbeli Dirac-elektronok felfedezésekor, jelentősen elősegítette a kétdimenziós

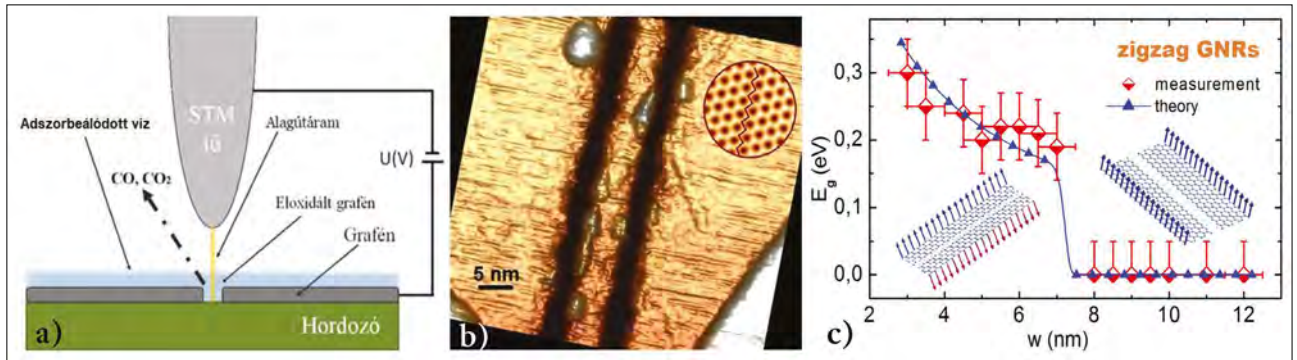
van der Waals-anyagok kutatását és alkalmazását. Azonban érdemes óvatosan eljárni, amikor már jól ismert módszereket új kutatási területeken próbálunk alkalmazni. Ezzel a kérdéssel szembesültünk, amikor azt próbáltuk megállapítani, hogy valójában milyen vastag egy grafénréteg, amely az előállítás után tipikusan SiO<sub>2</sub> felületen található. A mérendő probléma ilyenkor precízebben megfogalmazva az, hogy mennyire magas lépcsőt képez a grafén- vagy többrétegű grafitkristály a SiO<sub>2</sub> hordozó felületén. Erre a kérdésre a válasz elsőre egyszerűnek tűnhet: a grafénrétegek közötti van der Waals-kötéstávolság, ami 0,336 nm. Ugyanakkor azt tapasztaltuk, hogy a mérési eredmények igen változatosak, és a mért érték akár 0,3 nm-től 1 nm-ig is terjedhet (4. ábra). Sőt, bizonyos esetekben a grafén a SiO<sub>2</sub> felületen bemélyedésként is megjelent.

Szisztematikus mérések alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a nagyon eltérő mérési eredmények oka az atomierő-mikroszkóp tüje és a grafén, illetve SiO<sub>2</sub> hordozó közötti eltérő mechanikai kölcsönhatás. Méréseink során azt találtuk, hogy ha a tű és a minta közötti erőt erősen taszító jellegűre választjuk, akkor kiküszöbölhető ez a furcsa mérési anomália. Ez a tapasztalat jól rávilágít arra, hogy még a legegyszerűbb mérési feladatok is megfelelő körülményt igényelnek. A cikkünk, amelyben részletesen bemutatjuk ezt a mérési műterméket és javaslatokat teszünk a helyes mérési eljárásokra, több mint 700 hivatkozást kapott a publikálása óta.



4. ábra. Egy háromrétegű grafénmintának két különböző pásztázási paraméterrel mért ugyanazon területe. Látható, hogy a rétegek hordozóhoz képest mért magassága erősen eltér a bal és a jobb képen. Ennek az oka ott keresendő, hogy az AFM-tű más mechanikai kölcsönhatásban van a SiO<sub>2</sub> hordozó és a grafénkristály felületével. A helyes magasságmérés a jobb oldali ábrán valósul meg, olyan körülmények között, ahol a tű és a minta közötti erő erősen taszító jellegűre van beállítva

A grafén egyik legígéretesebb tulajdonságának már a kezdetektől azt tartották, hogy kiválóan vezeti az elektromos áramot. Töltéshordozóinak mozgékonyasága szobahőmérsékleten is kiemelkedően magas – vagyis egységnyi elektromos tér igen nagy sebességre tudja felgyorsítani őket –, így alkalmazásként azonnal ultragyors és ultra-kisfogyasztású, grafénalapú elektronikai eszközöket vizionáltak. Ezzel együtt megjelent az igény, hogy a grafén sávszerkezetében tiltott sávot hozzunk létre, hiszen a digitális elektronika működése félvezető eszközökre alapul, a grafén pedig eredeti formájában (fél-) fémes viselkedést mutat. Ugyanakkor az is nagyon fontos, hogy úgy tegyük félvezetővé a grafént, hogy közben a töltéshordozóinak kiemelkedően magas mozgékonyaságát megőrizzük. Elméleti számolásokkal megmutatták, hogy amennyiben a kétdimenziós grafénsíkból nanométeres szélességű szalagokat vágunk ki, azok



5. ábra. a) Az STM-litográfias módszer vázlatos működési elve. b) STM-litográfiaával létrehozott 5 nm széles cikcakkélú grafén nanoszalag STM-képe. c) A cikcakkélú grafén nanoszalagok tiltott sávja a szalag szélességének függvényében éles félvezető-fém átmenetet mutat, amely a szalagok spinpolarizált élei közötti mágneses csatolás antiferro-ferromágneses átkapcsolásával magyarázható. (Forrás: [27])

félvezető-elektronszerkezettel is rendelkezhetnek a szalag szélességének és éleinek kristálytani iránya függvényében. Megvolt tehát a recept a félvezető grafénszerkezetek (nanoszalagok) létrehozására, de nem volt hozzá megfelelő eszköz.

A feladatot elsőként Tapasztó Leventének sikerült megoldania az MFA-ban. A nanoméretű szerkezetek létrehozására legelterjedtebben használt eszköz az elektronsugaras litográfia volt, azonban ennek sem a pontossága (felbontása) nem volt megfelelően nagy, sem az élek kristálytani irányait nem lehetett kontrollálni az eljárás során. Ekkor merült fel bennünk az ötlet, hogy az STM-et lehetne alkalmazni grafén nanoszalagok létrehozására is. Az STM azon képessége, hogy a leképezésnél szokásoshoz képest jelentősen nagyobb feszültségek (5–10 V) alkalmazásával a minták felülete módosítható, már korábban is ismert volt, azonban ennek a módosításnak a pontossága ugyanúgy a néhány 10 nm-es tartományban mozgott, mint az elektronsugaras litográfia esetében. Ennek oka az, hogy a megmunkálást ultranagy vákuumban végezték, így addig kellett növelni a tű és a minta közé kapcsolt feszültséget (10 V), míg az STM-tűből kilépő elektronok energiája elegendően nagy volt, hogy a minta felületén a kötéseket felszakítsa. Ám ebben a feszültségtartományban az elektronok már nem alagutazással, hanem téremisszióval léptek ki az STM tűből, vagyis a csatorna, amelyben az elektronok haladtak a minta felé jelentősen kiszélesedett.

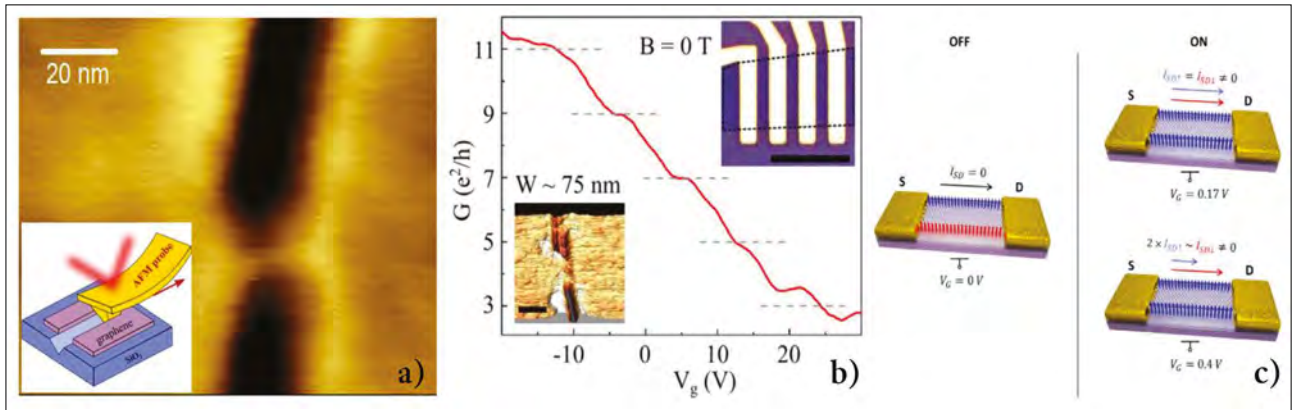
Az a körülmény, hogy mi nem ilyen feltételek között, hanem levegőn optimalizáltuk az STM-litográfias folyamatot, óriási előny jelentett, ugyanis a felületre adszorbeálódott víz segítségével a módosítást nem pusztán az elektronok becsapódása végezte, hanem azt egy kémiai marási folyamat segítette. Így sokkal kisebb küszöbfeszültségen (2–3 V) indult meg a minta módosítása (a grafén átvágása), vagyis sokkal kevésbé szélesedett ki az alagútcatorna. Ennek köszönhetően sikerült minden korábbinál pontosabbá tenni az STM-litográfias eljárást és kidolgozni a grafén nanomegmunkálásának legpontosabb módszerét, amellyel akár 2 nm széles grafén nanoszalagokat is reprodukálhatóan létre tudunk hozni (5. ábra). Ez a megmunkálás egy nagyságrenddel pon-

tosabb a korábbi módszerekhez viszonyítva. Továbbá kihasználva az STM atomi felbontású leképezési képességét, az STM-litográfiaiban a szalagok éleit a grafénrács jól meghatározott kristálytani irányában tudtuk kialakítani.

STM-litográfias eredményeink a *Nature Nanotechnology* folyóirat címlapjára kerültek [26], a módszert leíró publikációt mára már több mint ezren hivatkozták. Gyulai professzornak is nagyon tetszett a módszer, amelyet „nano-plazmapisztolynak” nevezett. Rendelkezésünkre állt tehát egy megfelelő pontosságú nanomegmunkálási eljárás, amellyel előre tervezett tulajdonságokkal (tiltottsáv-szélességgel) rendelkező félvezető nanoszalagokat tudunk létrehozni. A grafén nanoszalagok atomi és elektronszerkezetének összefüggéseit így először tudtuk szisztematikus módon kísérletileg feltárni, amely egy meglepő új eredményhez is vezetett. Alagútspektroszkópiai mérésekkel megfigyeltük, hogy a keskeny cikcakkélú szalagok esetében kialakuló tiltott sáv eredete a szalagok élein kialakuló mágneses rend. Eredményeinket a *Nature* folyóirat közölte [27], és mára már közel nyolcszáz másik munka hivatkozta.

Az STM-litográfiaának elengedhetetlen feltétele a vezető hordozó, ezért a létrehozott nanoszalagokat nem lehetett direkt módon elektronikai eszközökbe integrálni. Ennek megoldására is kidolgoztunk egy atomerő-mikroszkópos nanomegmunkálási eljárást, amelynek lényege, hogy az AFM-tűvel a grafént a magas szimmetriájú kristálytani irányai mentén hasítjuk. Ilyen módon sikerült az AFM-litográfias eljárás pontosságát is megjavítanunk, lehetővé téve mindössze 10 nm széles grafénszerkezetek létrehozását AFM-litográfiaival (6. ábra), amelyeket nanoelektronikai eszközökbe integrálva minden korábbinál robusztusabb működésű grafénalapú kvantum pontkontaktus-eszközöket tudunk létrehozni [28].

Elméleti számításokkal azt is megmutattuk, hogy amennyiben 10 nm-nél keskenyebb cikcakkélú szalagokat integrálni tudnánk egy egyszerű tervezérlésű tranzisztorkonfigurációba, a hátsó kapuelektrodával egyaránt vezérelhető lenne a grafén nanoszalagon keresztül folyó töltés- és spináram.

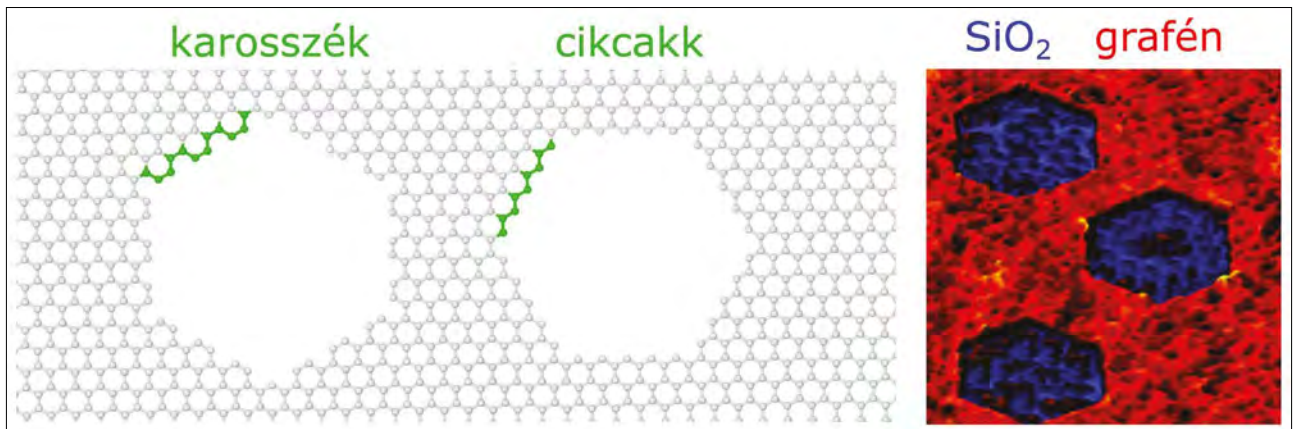


6. ábra. a) Egy AFM-litográfiával létrehozott mindössze 10 nm széles grafén nanohíd AFM-képe. b) A grafén nanohídra alapuló kvantumozású elektronikai eszköz, amely a vezetőképesség-quantum egész számú többszöröseinél mutat platókat. c) Cikcakkos grafén nanoszalagra épülő elektronikai eszköz elvi vázlata, amely a töltés- és spináramot egyaránt képes vezérelni egy egyszerű kapuelektrodával. (Forrás: [28])

Az STM-litográfias eljárással végzett kísérleteinkben sikeresen megmutattuk, hogy a grafén kristálytani irányban való megmunkálása kulcsfontosságú. Ezen túlmenően szükség lenne egy jól skálázható megmunkálási módszerre. A megoldást szinte véletlenül találta meg Nemes-Incze Péter, a *Nature Nanotechnology* egy korábbi számában megjelent cikkéből inspirálódva. Ebben a munkában szén nanocsövekkel „nanocsatornákat” hoztak létre  $\text{SiO}_2$  felületen, magas hőmérsékleten és oxigénmentes környezetben végzett hőkezeléssel [29]. A kísérlet során a szén nanocsövek a  $\text{SiO}_2$  hordozót redukálták  $\text{SiO}$ -ra, míg a szén maga oxidálódott,  $\text{CO}$ -t képezve. Mindkét reakciótermék 800 Celsius-fok körüli hőmérsékleten elhagyja a felületet, nanométeres szélességű marási csatornákat hagyva maga után. Laborunkban ezt a reakciót graféneken is alkalmazva felfedeztük, hogy a grafén szélei és rácshibái mentén  $700^\circ\text{C}$ -on megindul a redukálási reakció. Azonban meglepő módon a marás kizárólag a karosszék (armchair) irányokban haladt, cikcakkékeket hagyva hátra. Ezen mintáinkat részletesebb vizsgálatnak alávetve, a stuttgarti Max Planck Intézet munkatársaival együttműködve, Raman-spektroszkópiás mérésekkel bizonyítottuk, hogy a cikcakkékek kristálytani orientá-

ciójukban és atomi struktúrájukban is szinte tökéletesek [30]. A módszer kulcsfontosságú tulajdonsága, hogy rendkívül jól kontrollálható, mivel csak hibahelyekről indul a marási folyamat. Ezt kihasználva, AFM-tüvel létrehozott hibahelyekkel meghatározhattuk a kémiai marás kiindulási pontjait (7. ábra). Így akár 35 nm széles grafén nanoszalagokat is sikerült előállítani [31].

A grafén mellett egyre hangsúlyosabban kezdünk vizsgálni más kétdimenziós anyagokat, például molibdén-diszulfidot, amelynek először sikerült atomi felbontásban leképezni natív szerkezeti hibáit, illetve megfigyelni egy új oxidációs folyamatát, ahol az O-atomok egyedi kénatomokat lecserélve épülnek be a kétdimenziós  $\text{MoS}_2$  kristály rácsába. Ezzel párhuzamosan a pásztázószondás eszközparkon is komoly fejlesztések történtek az időközben elnyert Lendület-és ERC-projekteknek köszönhetően. Két alacsony hőmérsékletű STM- és spektroszkópiás méréseket is lehetővé tevő berendezéssel bővítettük az eszközeinket, amelyekkel az anyagok elektronszerkezetének olyan apró részletei is megfigyelhetők, mint egy 10 meV-os tiltott sáv, vagy az élekre lokalizált elektronállapotok. Az általunk vizsgált anyagok köre is tovább bővült topologikus szigetelő



7. ábra. Különböző kristálytani orientációjú lyukak a grafénben. A jobb oldali AFM-felvételen előre megtervezett pozícióban kimart, 500 nm oldalhosszúságú, cikcakkékekkel rendelkező nanolyukak

anyagokkal, illetve a kétdimenziós anyagok kontrollált elforgatásával létrehozható moiré-szuperrácsok és két-dimenziós heteroszerkezetek vizsgálatával.

A Gyulai professzor ionsugaras témáiból harminc évvel ezelőtt elindult pásztázószondás módszereken alapuló munkából mára egy nemzetközi szinten is elismert kutatócsoport alakult ki, amely a kétdimenziós anyagok kutatásának kiemelkedően sikeres művelője.

## Irodalom

1. Gyulai J.: Nanotudomány, nanoetchnológia. *Fizika Szemle* 2007/2, 71. <http://fi.ikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0702/gyulai0702.html>
2. Binnig Q., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.: Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl. Phys. Lett.* 40, (1982) 178–180.
3. Márk G. I.: Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 2006/6, 190. <http://fi.ikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0606/mark0606.html>
4. Ko W., Ma C., Nguyen G. D., Kolmer M., Li, A.: Atomic-scale manipulation and in situ characterization with scanning tunneling microscopy. *Advanced Functional Materials* 29(52), (2019) 1903770. <https://doi.org/10.1002/adfm.201903770>
5. Peng W., Wang H., Lu H., Yin L., Wang Y., Grandidier B., Yang D., Pi X.: Recent progress on the scanning tunneling microscopy and spectroscopy study of semiconductor heterojunctions. *Small* 17(50), (2021) 2100655. <https://doi.org/10.1002/sml.202100655>
6. Kahn E., Liu M., Zhang T., Liu H., Fujisawa K., Bepete G., Ajayan P. M., Terrones M.: Functional hetero-interfaces in atomically thin materials. *Materials Today* 37(August), (2020) 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.02.021>
7. Mogi H., Arashida Y., Kikuchi R., Mizuno R., Wakabayashi J., Wada N., Miyata Y., Tanimaka A., Yoshida S., Takeuchi O., Shigekawa H.: Ultrafast nanoscale exciton dynamics via laser-combined scanning tunneling microscopy in atomically thin materials. *Npj 2D Materials and Applications* 6(1), (2022) 72. <https://doi.org/10.1038/s41699-022-00345-1>
8. De Feyter S., De Schryver F. C.: Two-dimensional supramolecular self-assembly probed by scanning tunneling microscopy. *Chemical Society Reviews* 32(3), (2003) 139–150. <https://doi.org/10.1039/b206566p>
9. Ghoderao P., Sahare S., Lee S.-L., Sonar P.: Envision and appraisal of biomolecules and their interactions through scanning probe microscopy. *Small Structures* (2023) 2200273. <https://doi.org/10.1002/ssstr.202200273>
10. Binnig G., Quate C. F., Gerber C.: Atomic force microscope. *Physical Review Letters* 56(9), (1986) 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
11. Norman M. D. A., Ferreira S. A., Jowett G. M., Bozec L., Gentleman E.: Measuring the elastic modulus of soft culture surfaces and three-dimensional hydrogels using atomic force microscopy. *Nature Protocols* 16(5), (2021) 2418–2449. <https://doi.org/10.1038/s41596-021-00495-4>
12. Shi X., Qing W., Marhaba T., Zhang W.: Atomic force microscopy – Scanning electrochemical microscopy (AFM-SECM) for nanoscale topographical and electrochemical characterization: Principles, applications and perspectives. *Electrochimica Acta* 332, (2020) 135472. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135472>
13. Allendorf M. D., Dong R., Feng X., Kaskel S., Matoga D., Stavila V.: Electronic devices using open framework materials. *Chemical Reviews* 120(16), (2020) 8581–8640. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00033>
14. Dufrene Y. F., Viljoen A., Mignolet J., Mathelié-Guinlet M.: AFM in cellular and molecular microbiology. *Cellular Microbiology* 23(7), (2021) 1–12. <https://doi.org/10.1111/cmi.13324>
15. Biró L. P., Gyulai J., Havancsák K.: Scanning-tunneling-microscope investigation of a 215-MeV Ne-irradiated graphite surface. *Physical Review B* 52(3), (1995) 2047–2053. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.2047>
16. Biró L. P., Lazarescu S., Lambin P., Thiry P. A., Fonseca A., Nagy J. B., Lucas A. A.: Scanning tunneling microscope investigation of carbon nanotubes produced by catalytic decomposition of acetylene. *Physical Review B* 56(19), (1997) 12490–12498. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.12490>
17. Biró L. P., Lazarescu S. D., Thiry P. A., Fonseca A., Nagy J. B., Lucas A. A., Lambin P.: Scanning tunneling microscopy observation of tightly wound, single-wall coiled carbon nanotubes. *Europhysics Letters (EPL)* 50(4), (2000) 494–500. <https://doi.org/10.1209/epl/i2000-00296-0>
18. Biró L. P., Ehlich R., Osvath Z., Koós A. A., Horváth Z. E., Gyulai J., Nagy J. B.: From straight carbon nanotubes to Y-branched and coiled carbon nanotubes. *Diamond and Related Materials* 11, (2002) 1081–1085.
19. Osvath Z., Koós A. A., Horváth Z. E., Gyulai J., Benito A. M., Martínez M. T., Maser W. K., Biró L. P.: Arc-grown Y-branched carbon nanotubes observed by scanning tunneling microscopy (STM). *Chemical Physics Letters* 365, (2002) 338–342.
20. Biró L. P., Ehlich R., Osvath Z., Koós A., Horváth Z. E., Gyulai J., Nagy J. B.: Room temperature growth of single-wall coiled carbon nanotubes and Y-branches. *Materials Science and Engineering: C* 19(1–2), (2002) 3–7. [https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(01\)00405-2](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(01)00405-2)
21. Biró L., Gyulai J., Havancsák K.: Scanning probe microscopy investigation of nanometer structures produced by irradiation with 200 MeV ions. *Vacuum* 50(3–4), (1998) 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00051-7)
22. Biró L. P., Gyulai J., Havancsák K., Didyk A. Y., Bogen S., Frey L.: Use of atomic-force microscopy and of a parallel irradiation geometry for in-depth characterization of damage produced by swift Kr ions in silicon. *Physical Review B* 54(17), (1996) 11853–11856. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11853>
23. Biró L. P., Márk G. I., Gyulai J., Havancsák K., Lipp S., Leherer C., Frey L., Ryssel H.: AFM and STM investigation of carbon nanotubes produced by high energy ion irradiation of graphite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 147, (1999) 142–147.
24. Biró L. P., Szabó B., Mark G. I., Gyulai J., Havancsák K., Kürti J., Dunlop A., Frey L., Ryssel H.: Carbon nanotubes produced by high energy ( $E > 100$  MeV), heavy ion irradiation of graphite. *Nuclear Instruments Methods* 148, (1999) 1102–1105. <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0168583X98007381>
25. Nemes-Incze P., Osvath Z., Kamarás K., Biró L. P.: Anomalies in thickness measurements of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy. *Carbon* 46(11), (2008) 1435–1442. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.06.022>
26. Tapasztó L., Dobrik G., Lambin P., Biró L. P.: Tailoring the atomic structure of graphene nanoribbons by scanning tunnelling microscope lithography. *Nature Nanotechnology* 3(7), (2008) 397–401. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.149>
27. Magda G. Z., Jin X., Hagymási I., Vancsó P., Osvath Z., Nemes-Incze P., Hwang C., Biró L. P., Tapasztó L.: Room-temperature magnetic order on zigzag edges of narrow graphene nanoribbons. *Nature* 514(7524), (2014) 608–611. <https://doi.org/10.1038/nature13831>
28. Kun P., Fülöp B., Dobrik G., Nemes-Incze P., Lukács I. E., Csonka S., Hwang C., Tapasztó L.: Robust quantum point contact operation of narrow graphene constrictions patterned by AFM cleavage lithography. *Npj 2D Materials and Applications* 4(1), (2020) 43. <https://doi.org/10.1038/s41699-020-00177-x>
29. Byon H. R., Choi H. C.: Carbon nanotube guided formation of silicon oxide nanotrenches. *Nat. Nanotechnol.* 2007, 2(3), 162–166.
30. Krauss B., Nemes-Incze P., Skakalova V., Biro L. P., von Klitzing K., Smet J. H.: Raman scattering at pure graphene zigzag edges. *Nano Letters* 10, (2010) 4544–4548. <https://doi.org/10.1021/nl102526s>
31. Nemes-Incze P., Magda G., Kamarás K., Biró L. P.: Crystallographically selective nanopatterning of graphene on SiO<sub>2</sub>. *Nano Research* 3(2), (2010) 110–116. <https://doi.org/10.1007/s12274-010-1015-3>

# OPTIKAI MÓDSZEREK AZ MFA-BAN

Petrik Péter, Fried Miklós, Lohner Tivadar  
HUN-REN EK MFA, Budapest

Írásunkat a *Fizikai Szemlében* 2007-ben „Az ellipszometria alkalmazása félvezetőfizikai kutatásokban” címmel megjelent cikkünk folytatásának is tekinthetjük, sajnos már Gergely György nélkül. A történet ott 1965-ben indul, azaz jelen cikkünk alcíme akár „Az ellipszometria első 60 éve intézetünkben” is lehetne – bár az optikai módszerek köre azóta jelentősen bővült az intézetben, az ellipszometria alkalmazása pedig Magyarország-szerte. Az alábbiakban ezekre is igyekszünk kitérni – természetesen a teljesség igénye nélkül.

## A kezdetek

2007-es cikkünkben [1] részletesen foglalkoztunk a Műszaki Fizikai és a Távközlési Kutatóintézetben induló kezdeményezéssel, amely 1966-ban egy saját készítésű ellipszométerhez, majd 1971-ben az úgynevezett Gergely-táblázathoz vezetett [2], amelyben a mikroelektronikában kiemelkedő jelentőségű, az egykristályos szilícium felületén létrehozott termikus oxid különböző vastagságértékeihez található számolási adatok az akkoriban elterjedten használt hullámhossz- és beesési-szög-értékekre. A 70-es években az ellipszometria Magyarországon, csakúgy mint külföldön, kulcsfontosságú volt a mikroelektronikai és félvezetőfizikai szerkezetek vastagságának és tulajdonságainak a meghatározásában. Mivel az ellipszometria által négytizedes pontossággal meghatározott dielektromos állandó képzetes része a csatolt állapotsűrűséggel arányos, ezekből a mérésekből nagy érzékenységgel meghatározhatók az elektronszerkezeti és ezáltal a kristályszerkezeti változások [3].

A 80-as években létrejött egy szerencsés együttállás, ugyanis az ellipszometriával kapcsolatos növekvő igények mellett a technikai lehetőségek is ekkor kezdtek el megjelenni. Indirekt módszer lévén nemcsak a mérés vezérléséhez, de a mért adatok kiértékeléséhez is szükség volt számítástechnikai kapacitásra, amely a számítógépek árának gyors csökkenésével egyre elérhetőbbé vált. Így nemcsak Magyarországon, de világszerte gyors fejlődésnek indult a módszer. A minta vizsgálatához nincs

szükség koherens forrásra, ezért alkalmas fényforrás, polarizáló elem és detektor használatával már a 19. század végén végeztek ellipszometriai mérést [4], az „ellipszometer” elnevezés pedig 1944-ből származik [5], ahol már tized nanométeres érzékenységet demonstráltak fehérjerétegek vastagságának mérésére. A módszer elvét korábbi írásunkban részleteztük [1], ezért arra itt most nem térünk ki. Fontos kiemelni, hogy az ellipszometria viszonylag egyszerű hardverelemek segítségével képes nanométeres pontosságú rétegvastagság- és  $10^{-4}$ -es pontosságú törésmutató-meghatározásra. A koherens forrás szükségtelensége miatt spektroszkópiai mérés is könnyen végezhető, a pontosság azonban nagyban függ a hardverelemek precíz vezérlésétől és kalibrációjától, valamint a mért adatok értelmezésétől, azaz a megfelelő fizikai modellek használatától. Az ellipszometria jelenlegi kifinomultságára jellemző, hogy a laborunkban jelenleg használatban lévő mintegy 15 éves ellipszométer tökéletesen alkalmas a legmodernebb, akár folyamatkövető mérések elvégzésére – azonban a kiértékelési módszerek és a folyamatkövető mérések végzéséhez szükséges cellák és hardverelemek folyamatos és intenzív fejlesztést igényelnek.

A módszer az oxidrétegek meghatározása mellett különösen alkalmasnak bizonyult az ionimplantáció által keltett amorfizáció nyomon követésére [6]. A Gyulai József nevével fémjelzett ionimplantációs célprogram kiemelt fontosságú volt ebben az időben, és az ionsugaras analitikával végzett kristályszerkezeti méréseket az ellipszometria nagyon jól kiegészítette. Ebben ugyan na-



*Petrik Péter* fizikus mérnök a HUN-REN EK MFA Fotonika Laboratóriumának vezetője és a Debreceni Egyetem Villamosmérnöki Tanszékének egyetemi tanára. Diplomája (BME, 1994), PhD értekezése (BME, 2000) és MTA doktoriája (2016) egyaránt optikai vizsgálati módszerek és funkcionális anyagok fejlesztéséhez és alkalmazásához kötődik. Vendégkutatóként összesen közel öt évet töltött Németországban, az USA-ban és Hollandiában. Több mint 200 lektorált folyóiratcikk és 4 könyvfejezet társszerzője, 7 PhD-hallgató témavezetője. Jelenleg vékonyrétegek és szilárd-folyadék határfelületek folyamatkövető vizsgálati módszereinek fejlesztésével foglalkozik.



*Fried Miklós* fizikus, diplomáját és doktori fokozatát az ELTE TTK-n szerezte, majd 2005-ben lett az MTA doktora. Az MTA KFKI MKI, majd MTA ATKI, majd MTA MFA főmunkatársa, a HUN-REN EK MFA tudományos tanácsadója és az Óbudai Egyetem Kandó Villamosmérnöki Karán egyetemi tanár. Számos hazai és nemzetközi K+F projekt témavezetője (RESPECT-COPERNICUS, (SEA-4KET), E450EDL) volt. Több mint 200 publikációjára több mint 2000 független hivatkozás található. 2014-ben Akadémiai Szabadalmi Nívódíjat kapott.



*Lohner Tivadar* fizikus, diplomáját és doktori fokozatát az ELTE TTK-n szerezte, majd 2013-ban lett az MTA doktora. Az MTA KFKI MKI, majd MTA ATKI, majd MTA MFA főmunkatársa, tudományos tanácsadója, jelenleg a HUN-REN EK MFA emeritusz professzora Csillebércen. Dolgozott a Twente Egyetemen, a Pennsylvániai Állami Egyetemen és az Oszakai Egyetemen. Döntő szerepe volt a spektroszkópiai ellipszometria, egy máig töretlenül fejlődő optikai vizsgálati módszer magyarországi meghonosításában és művelésében, amelyből számos tudományos munka született. 2022-ben a Magyar Erdemrend tisztikereszt (polgári tagozat) kitüntetésben részesült.

gyon sok világtrend szerepet játszott, de mára az optikai módszerek indirekt karakterük ellenére is igen jelentős, az ionsugaras analitikán is túlmutatató jelentőségre tettek szert, és a méretek csökkenésével, a 2D anyagok megjelenésével, valamint a folyamatkövető módszerek iránti fokozatosan növekvő igény következtében alkalmazásuk jelenleg is terjed.

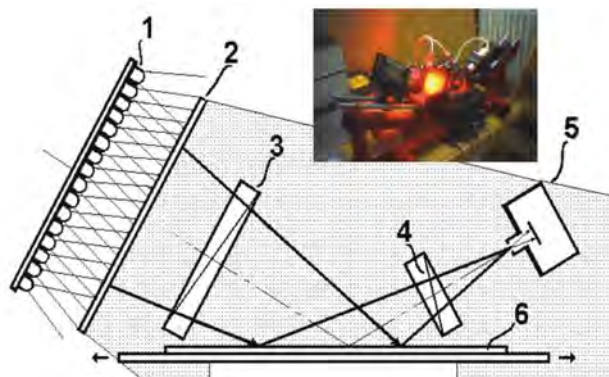
## Félvezetőfizikai alkalmazások az MFA-ban

Az ionimplantált szerkezetek ionsugaras analitikájának kiegészítéseként az ellipszometriát sikeresen alkalmaztuk a roncsoltság optikai mérésére [6]. A spektroszkópiai mérések lehetővé tették összetett modellek alkalmazását, és ezáltal akár a roncsoltság mélységfüggésének a meghatározását is [7]. A 90-es évek derekán az intézet első EU-projektje is az ellipszometria és reflektometria vékonyréteg-rendszerekre történő alkalmazásához kötődött Bársony István igazgatóhelyettesünk hathatós segítségével, aki ebben az időszakban Hollandiából tért haza. Az ő vezetésével átszervezett Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet (MFA) mikrotechnológiai bázisának legfőbb alkalmazási területévé a szenzorika vált, mert ebben nem volt szükség a legmodernebb litográfiai berendezésekre. Ezen periódus egyik legfontosabb anyaga a pórusos szilícium volt, melynek előállítására, vizsgálata és szenzorikai alkalmazása egyaránt az MFA-ban történt. A szilícium és a szilíciumban létrejövő üregek közötti jelentős optikai kontraszt miatt az ellipszometria rendkívül alkalmasnak bizonyult pórusos szilícium rétegszerkezetek nagy érzékenységű vizsgálatára [8, 9].

A félvezető anyagok vizsgálata a 90-es évek végén Petrik Péter vendégkutatói munkája révén, amit az erlangeni Fraunhofer Intézetben végzett, kiegészült poliszilícium vékonyrétegek vizsgálatával. Ez a munka alkalmas teremtett olyan szerkezeti paraméterek hathatósabb vizsgálatára, mint a felületi érdesség, amelyről Biró László atomerő-mikroszkópos összehasonlító méréseivel ki lehetett mutatni, hogy a nanométeres skálán kvantitatív módon meghatározható ellipszometriai mérésekkel [10]. A polikristályos anyagok vizsgálata kapcsán szerzett tudást később a nanokristályos szilícium modellezésében hasznosítottuk, többek között szilícium-nitridben [14] és pórusos szilíciumban [15].

## Térképező ellipszométer fejlesztése

A 60-as években indult berendezésfejlesztés lényegében folyamatosan zajlott és zajlik napjainkig. A kilencvenes években fejlesztett nagy pontosságú goniométerrel és spektroszkópiai opcióval megvalósított ellipszométer [11] után egy ötlet és néhány nagyobb lélegzetvételű projekt folyamánként nagy felületű térképező ellipszométert (1. ábra) fejlesztettünk Fried Miklós vezetésével többféle konfigurációban [12], amelyből szabadalmak is



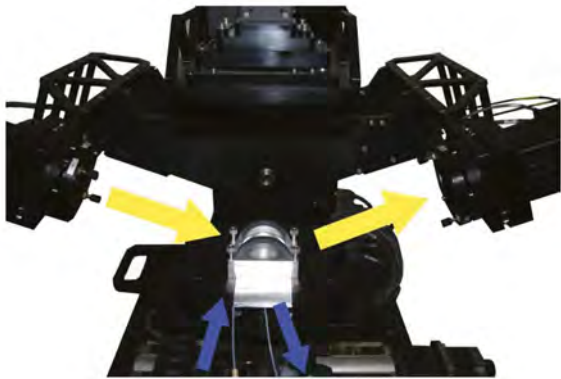
1. ábra. Nem kollimált kiterjedt fényforrást és lyukkamerát használó ellipszometriai elrendezés nagy felületek gyors optikai térképezésére (1: fényforrás; 2: diffúzor; 3 és 4: polarizátor; 5: lyukkamera; 6: minta)

születtek [16]. Divergens nyalábot használva nagyságrendekkel csökkentettük a térképezéshez szükséges időt, miközben a minta mozgatásával és a detektor egyik dimenziójának spektroszkópiai alkalmazásával hullámhosszfüggő méréseket tudtunk megvalósítani ugyanabban az elrendezésben [13]. Ezzel egy olyan eszköz készült, amellyel akár méteres kiterjedésű felületen, ezer pontban, nanométeres pontossággal, perces időtartamon belül lehet vékonyrétegek vastagságát és törésmutatóját meghatározni. Ehhez hasonló eszköz jelenleg nem ismert az irodalomban [17].

## Folyamatkövető vizsgálatok

Az ellipszometria egyik kiemelkedő előnye a fent említett egyszerű hardveres kialakítás, a könnyen megvalósítható spektroszkópia, a nanométeres érzékenység és a másodperces időfelbontás mellett a roncsolásmentesség. A nagy sebesség, érzékenység és roncsolásmentesség kombinációja, valamint a nagy behatolási mélység vizes közegben különösen alkalmas teszi a módszert biológiai folyamatok és szilárd-folyadék határfelületi jelenségek szubnanométeres érzékenységű folyamatkövető vizsgálatára. Bár a szilícium termikus oxidációjának nyomon követésével kapcsolatos kísérletekben Petrik Péter már a 90-es évek végén részt vett Erlangenben egy ellipszométer vertikális kemencébe történő integrálásával [18], az in situ vizsgálatokra irányuló széles körű hardverfejlesztések csak a 2010-es évek elején indultak el az MFA Fotonika Osztályán.

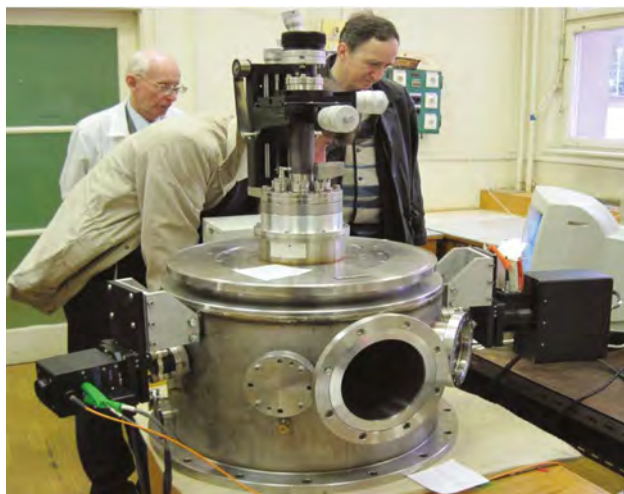
Ennek legfőbb motorja egy együttműködés volt Vonderviszt Ferencsel és munkatársaival a Pannon Egyetemen, amelyben géntechnológia segítségével módosított flagelláris filamentumok adszorpcióját [19] és szenzorikai tulajdonságait [20] vizsgáltuk. A folyadékfázisú *in situ* mérések pontosságát 2–3 nagyságrenddel tudtuk növelni a Ferencz Kárpát által tervezett plazmonikus [21] és Bragg-multirétegszerkezetek [22] alkalmazásával Kretschmann–Raether-elrendezésben (2. ábra). A témában számos MFA-szerte hozzáférhető tudást hasznosítani tudtunk, mint pl. a Sáfrán György szabadalma alapján



2. ábra. Kretschmann–Raether-elrendezésű folyadékcella egy gyári ellipszométer mozgatható asztalán

készülő kombinatorikus szerkezeteket [23], vagy Horváth Róbert hullámvezető spektroszkópai módszerét, amelyet az ellipszometriai mérésbe integráltunk [24]. Hasonlóképpen a katalízislaboratórium által használt ciklikus voltammetria módszerének ellipszometriával való egyesítése is folyamatban van.

A félvezető és vákuumfizikai tudásunkat tovább kamatoztatva a Részecske- és Magfizikai Intézzel (RMI) együttműködésben folyamatkövető spektroszkópai ellipszométert szereltünk a Wigner Fizikai Kutatóközpont ionimplantáló berendezésének (nehézion-kaskádgyorsító, NIK) vákuumkamrájára (3. ábra), amellyel az egykristályos germánium amorfizációját követtük valós időben 200 keV energiájú antimonionok implantációja közben. A méréseket 3 s időfelbontással végeztük hetven fotonenergia-értéknél az 1,6–3,5 eV tartományban. A rácsrendezetlenség növekedését különféle optikai modellek konstruálásával követtük [25]. Ez az első, és – jelenlegi tudásunk szerint – egyedülálló eredmény az ionimplantáció közben bekövetkező szerkezeti változás valós idejű ellipszometriai megfigyelésére. Szomorú tény, hogy ez Gyulai József utolsó közleménye, amelynek a megvalósításában még részt vett, de a cikk megjelenését már nem érthette meg.



3. ábra. Ionimplantációs kamrára szerelt folyamatkövető ellipszométer

A szilárd-folyadék határfelületi vizsgálatok mellett az optikai cellák fejlesztésének másik fő iránya a magas hőmérsékletű vizsgálatokra alkalmas hőcellák fejlesztése. Saját fejlesztésű cellánkban egy fókuszált foltot mozgatva is lehetőség nyílik folyamatkövető mérésekre 600 °C hőmérsékletig, akár egy másodperces időfelbontással a 193–1690 nanométeres hullámhossztartományban. A cirkónium oxidációjának [26] és a vanádium fázisátalakulásának [27] nyomon követése mellett plazmonikus aranyrétegen is végeztünk magas hőmérsékletű referenciaméréseket a „forró” elektronok tulajdonságainak tanulmányozása céljából [28], valamint szobahőmérsékleten grafitfelületen hosszú idejű méréseket monomolekuláris rétegek kialakulásának nyomon követésére [29].

## Az ellipszometriával kapcsolatos kutatás eredményei és hatása

Azóta, hogy Lohner Tivadar az ellipszometriai témát a 80-as évek közepén elindította, több mint 300 nemzetközi referált folyóiratcikk született, amelyekre több, mint 3000 független hivatkozás érkezett. Fontos megjegyezni, hogy a mikroelektronikai és félvezetőfizikai közlemények hatása témájuknál fogva az esetek többségében messze túlmutat a hivatkozásokon, mivel ezek célközönsége az esetek jelentős részében nem publikál (pl. ipar, oktatás). A laborban végzett 16 PhD-hallgató nagy része fejlesztési munkát végez az iparban, közülük számosan a szűken vett ellipszometria területen tudtak elhelyezkedni ipari alkalmazásban. A Semilab Zrt. ellipszometria csoportját laborunk három egykori PhD hallgatója erősíti. Ellipszometria témájában emellett született három MTA doktori cím (4. ábra) és számtalan MSc-, illetve BSc-dolgozat is. A labor három munkatársa oktat rendszeresen egyetemen. A befejezett projektek száma meghaladja a harmincat, melyek becsült összes bevétele több, mint hárommillió euró. Az eddigi együttműködő partnerek száma



4. ábra. Lohner Tivadar, Fried Miklós és Petrik Péter (balról jobbra) a 2. Nemzetközi Ellipszometriai Konferencián 1997-ben Charlestonban

is harminc fölött jár – a kapcsolatok jelentős része máig aktív. Mára az MFA-n kívül számos kutatóintézetben (pl. Wigner RMI, Természettudományi Kutatóközpont) és egyetemen (Szegedi Egyetem, Debreceni Egyetem), valamint ipari cégnél (pl. Guardian Orosháza) használnak rutinszerűen ellipszometriát. Az egyik legjelentősebb gyártót, a SOPRA nevű céget a 2010-es évek környékén felvásárolta a magyar Semilab Zrt.

## Az optikai módszerek kiteljesedése

Riesz Ferenc a kilencvenes évek második felétől fejleszti a felületi görbültség optikai mérésére alkalmas Makyoh-topográfia módszerét [30], amelynek mára nemzetközi szinten elismert szakértője. A módszer alkalmas számos félvezetőtechnológiai eljárás (pl. szeletvágás, -csiszolás, marás, fémezés, epitaxia) minősítésére, vékonyrétegekben kialakuló feszültségek értékelésére. Ez a technika számos alapvető fejlesztési eredmény után (pl. a képkalkotás geometriai modellje, aberrációmentes képkalkotás tükör segítségével), ma is aktuális fejlesztési és alkalmazási lehetőségeket hordoz.

A plazmonikus kolloid nanorészecskék optikai tulajdonságai nagy mértékben függenek azok alakjától, felületi borítottságától és kölcsönhatásától más részecskékkel [31]. Deák András csoportja olyan egyrészecskés folyamatkövető spektroszkópiai módszert fejlesztett ki, amellyel egyedi részecskék kölcsönhatásait és szerveződését lehet vizsgálni a felületük és a közeg kémiai tulajdonságaitól függően [32]. A téma jelentősége a fundamentális anyagvizsgáló és felületkémiai fejlesztések mellett a kontrollált önszerveződést kihasználó alkalmazásokban rejlik. Zámbo Dániel Németországból való visszatéréseivel a téma katalitikus célokra is alkalmazható speciális (pl. fém-félvezető kompozit) krioaerogélek kutatásával és optikai vizsgálatával egészült ki [33].

Részben optikai módszernek tekinthető a felület nedvesíthetőségének mérésére szolgáló kontaktszögmérés Nagy Norbert által továbbfejlesztett változata, amelyben ülcsepp helyett egy kapilláris cső tartja a vízcseppet négy mért paraméterrel: hídávolság, erő, nyak- és talpméret [34]. Ezen paraméterek mérése, kiegészítve a csepp alakjának analitikus modellezésével, alkalmassá teszi a módszert a kontaktszög sokkal szélesebb paramétertartományban való pontos mérésére és további nedvesíthetőségre jellemző paraméterek meghatározására.

## Záró gondolatok

A hatvanas évek előzményeiben, az ionimplantációs célprogramban és a számítógépes technika felgyorsuló elérhetőségében rejlő történelmi „együttállást” kihasználva a nyolcvanas években Lohner Tivadar vezetésével elindult Csillebércen az ellipszometria fejlesztése, amely 40 év után is töretlenül folytatódik. Ezalatt országsszerte számos kutatóintézetben, egyetemen és cégnél elterjedt a módszer, amelynek a jelentősége a szenzorika, a

folyamatkövető módszerek, 2D anyagok és egyre vékonyabb felületi struktúrák térnyerésével tovább növekszik. Gyulai József a kezdeti kételkedés után és ellenére töretlen támogatója volt a módszer fejlesztésének – szinte sorsszerű, hogy utolsó közleményében egy úttörő jelentőségű ellipszometriai fejlesztésről megjelent közlemény utolsó szerzője.

A már az Energiatudományi Kutatóközpont égisze alatt működő MFA Fotonika Laboratóriumának és Ellipszometria Csoportjának honlapjai elérhetők a *photo-nics.hu* és az *ellipsometry.hu* címen. A szerzők közöttüket fejezik ki egykori és jelenlegi munkatársaiknak az eredmények eléréséhez nyújtott segítségükért, és az MFA-ra mindig is jellemző nagyszerű munkaléghőkört.

## Irodalom

1. Lohner T., Gergely G., Petrik P., Fried M.: *Fizikai Szemle* 57 (2007) 310.
2. Gergely G., Forgács G., Szücs B., Dao van Phouc: *Akadémiai Kiadó*, Budapest 1971.
3. Fried M., Lohner T., Aarnink W., Hanekamp L. J., Vansilfhout A.: *Journal of Applied Physics* 71 (1992) 5260.
4. Drude P.: *Ann. Phys.* 272 (1889) 532.
5. Rothen A.: *Review of Scientific Instruments* 16 (1945) 26.
6. Lohner T., et al.: *Nuclear Instruments and Methods B* 85 (1994) 335.
7. Fried M., Lohner T., Aarnink W. a. M., Hanekamp L. J., van Silfhout A.: *Journal of Applied Physics* 71 (1992) 2835.
8. Fried M., et al.: *Thin Solid Films* 276 (1996) 223.
9. Vázsonyi É., et al.: *Thin Solid Films* 388 (2001) 295.
10. Petrik P., et al.: *Thin Solid Films* 315 (1998) 186.
11. Mosoni T., Petrik P., Fried M., Bársony I.: *Proceedings of SPIE* 3573 (1998) 355.
12. Fried M., Juhász G., Major C., Petrik P., Polgár O., Horváth Z., Nutsch A.: *Thin Solid Films* 519 (2011) 2730.
13. Shan A., et al.: *IEEE Journal of Photovoltaics* 4 (2014) 355.
14. Basa P., Petrik P., Fried M., Dobos L., Pécz B., Tóth L.: *Physica E* 38 (2007) 76.
15. Petrik P., Fried M., Vázsonyi É., Lohner T., Horváth E., Polgár O., Basa P., Bársony I., Gyulai J.: *Applied Surface Science* 253 (2006) 200.
16. Horváth Z. G., Juhász G., Fried M., Major C., Petrik P.: *Szabadelom* US8437002B2 (2008).
17. Petrik P., Fried M.: *Physica Status Solidi (a)* (2022) 2100800.
18. Petrik P., Schneider C.: *Vacuum* 61 (2001) 427.
19. Kozma P., et al.: *Applied Surface Science* 257 (2011) 7160.
20. Labadi Z., et al.: *ACS Biomaterials Science and Engineering* 6 (2020) 3811.
21. Kalas B., Nador J., Agocs E., Saftics A., Kurunczi S., Fried M., Petrik P.: *Applied Surface Science* 421 (2017) 585.
22. Kalas B., Ferencz K., Saftics A., Czigany Z., Fried M., Petrik P.: *Applied Surface Science* 536 (2021) 147869.
23. Kalas B., Sáfrán G., Serényi M., Fried M., Petrik P.: *Applied Surface Science* 606 (2022) 154770.
24. Agocs E., et al.: *Applied Surface Science* 421 (2017) 289.
25. Lohner T., et al.: *Materials Science in Semiconductor Processing* 152 (2022) 107062.
26. Romanenko A., Agocs E., Hózer Z., Petrik P., Serényi M.: *Applied Surface Science* 573 (2022) 151543.
27. Pósa L., et al.: *Nanomaterials* 11 (2021) 212.
28. Budai J., et al.: *Nature Communications* 13 (2022) 6695.
29. Pálinkás A., et al.: *Nature Communications* 13 (2022) 6770.
30. Riesz F.: *Journal of Physics D* 33 (2000) 3033.
31. Pothorszky S., Zámbo D., Deák T., Deák A.: *Nanoscale* 8 (2016) 3523.
32. Zámbo D., Radnóczy G. Z., Deák A.: *Langmuir* 31 (2015) 2662.
33. Zámbo D., Rusch P., Lübckemann F., Bigall N. C.: *ACS Applied Materials and Interfaces* 13 (2021) 57774.
34. Nagy N., *Langmuir* 35 (2019) 5202.

# TRANSZMISSZIÓS ELEKTRONMIKROSKÓPIA AZ MFA-BAN

Lábár János, Pécz Béla

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Budapest

Az MFA (Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet) 1998-ban jött létre a KFKI-beli (Központi Fizikai Kutatóintézet) ATKI (Anyagtudományi Kutatóintézet) és a Fóti úti MFKI (Műszaki Fizikai Kutatóintézet) egyesülésével, melynek szorgalmazója Gyulai József volt. Az elektronmikroszkópia ekkor költözött a KFKI-ba az új egyesített intézetbe. Bár Gyulai József fő kutatási területe nem az elektronmikroszkópia volt, mégis tekinthetjük őt elektronmikroszkóposnak, hiszen amikor USA-beli tanulmányútján mikroszkópos analízisre volt szüksége, akkor általában éjszakára lefoglalta a berendezést, mégpedig technikusai segítség nélkül. Úttörő jellegű munkát végzett a GaAs vegyület-félvezető kontaktusai terén is, így 1971-ben megjelent cikke [1] számunkra sokkal később is alapcikknek számított [2].

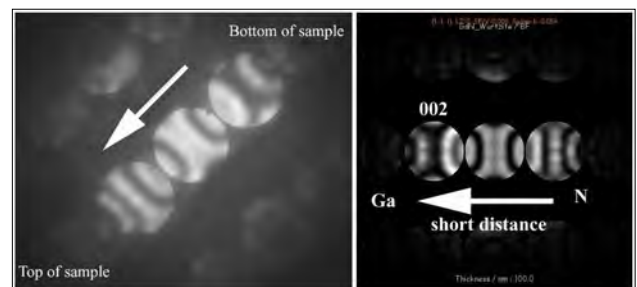
Az MFKI korábbi évtizedes mikroszkópos hagyományait az *in situ* kísérletek fémjelezték. A Fóti úti intézet 1963-ban szerzett be egy korszerű, 100 kV-os JEOL elektronmikroszkópot, ezért bizvást mondhatjuk, hogy a jogutód intézetben a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) 60 éves. Az *in situ* kísérletek röviden mondva úgy folytak, hogy a mikroszkópban párologtattak vékonyrétegeket, melyek technikai háttérét Barna Árpád valósította meg. A JEM 6A TEM tárgyterébe beépített kísérleti berendezéssel akár két elemet is lehetett egymás után párologtatni, a gőz-folyadék-kristályos fázisátmenetet, a kristályok növekedését és folyadékszerű összenövését, a textúra kialakulását megfigyelni, filmre venni, valamint elektromos ellenállást és Hall-effektust mérni [3, 4]. A kísérletek Barna B. Péter, Barna Árpád és Radnóczy György nevéhez kötődtek. A lehetőségek anynyira komplexek voltak, hogy bár az *in situ* fűtést és ellenállásmérést körülbelül két éve az új gömbhiba-korrigált 200 kV-os mikroszkópban is megvalósítottuk, a korábbi lehetőségek teljes köre ezen a mikroszkópon nem áll rendelkezésre.

Barna Árpád az 1980-as évek elején elsőként dolgozott ki olyan modellt, amellyel nagy felületen lehet követni a morfológia alakulását az ionsugaras porlasztás paramétereinek és geometriájának függvényében. Erre

alapozva az argonionos vékonyító teljes kifejlesztését is elvégezte, és azt piacképesen adta át hasznosításra a Technoorg Linda Kft.-nek.

Az új, egyesült intézet nemsokára sikerrel pályázott előbb egy új TEM-re – ez lett a JEOL 3011, egy 300 kV-os TEM. Nem sokkal később egy ennél drágább kiegészítő berendezésre pályáztunk sikeresen, a Gatan Imaging Filterre (GIF). Ennek segítségével mintegy 15 évig versenyképesek lettünk az EU-pályázatokban. A mikroszkóp 0,17 nm-es felbontásával lehetővé tette a félvezetők mellett már fémek (egyes kristallográfiai irányokból történő) rácsfelbontású leképezését is. Bár a laikus számára az évtizeddel korábbi CM-20 TEM 0,27 nm-es felbontásához képest nem rögtön nyilvánvaló a hatalmas javulás, valójában a 0,2 nm átlépésével nyílt meg a lehetőség az anyagok széles körének nagyfeloldású (HRTEM, azaz high-resolution TEM) vizsgálatára, hiszen számos anyagban ez a 0,2 nm tipikusan előforduló ráctávolságnak számít. A TEM-ben konvergens sugaras elektromos diffrakció (convergent-beam electron diffraction, CBED) segítségével lehetőségessé vált a félvezetők polaritásának rutinszerű meghatározása, melyre az 1. ábra mutat egy példát.

A GIF kétféle analitikai üzemmódja az elektron-energiavesztési spektroszkópia (EELS), ami a besugárzó, fix energiájú elektronoknak az elektron-anyag kölcsönhatásban elszenvedett veszteségeit adja meg, illetve



1. ábra. Bal oldalon a kísérletileg rögzített CBED-kép, jobb oldalon a szimulációval kapott eredmény, melyből a GaN-réteg polaritása a két kép összehasonlítása után megállapítható. E módszerrel mértük néhány 10 nm széles domén egymással ellentétes polaritását [5]



Lábár János a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont tudományos tanácsadója, az MTA doktora. Fő kutatási területe elektronmikroszkópos módszerek fejlesztése és alkalmazása félvezető szerkezetekre és fémes anyagokra. Jelenleg a SIQUOS című, kvantumbitek MOSFET technológiával kompatibilis, skálázható fejlesztésére irányuló, EU-projektben vezeti a magyar részvételt.

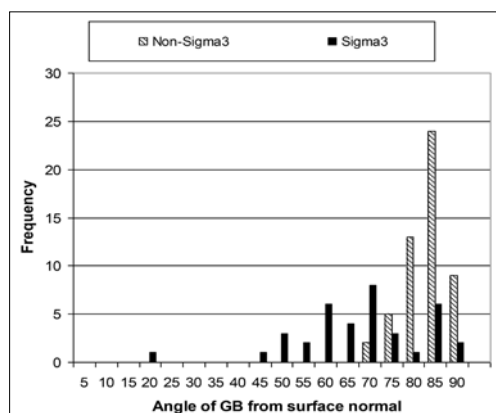


Pécz Béla fizikus, az MTA levelező tagja. a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének jelenlegi igazgatója. Fő kutatási területe a félvezető rétegek szintézise és elemzése atomi felbontású elektronmikroszkópiával és analitikai módszerekkel.

az energiaszelektív leképezés (energy-filtered TEM, EFTEM), ami egy, a kiválasztott veszteséggel továbbhaladó elektronokkal készített kép vagy elektrondiffrakció rögzítését teszi lehetővé. Az EFTEM-kép speciális fajtája a pásztázó feltét nélkül készült elemtérkép. A veszteség nélkül továbbhaladó elektronokkal (ZLP, azaz zero loss peak) készített diffrakciós felvételek lehetővé tették az elméleti szimulációkkal való összevetést (pl. polarizációmérést egy félvezetőeszköz szubmikronos tartományaiban [5], vagy az egyes kémiai elemeknek a különböző krisztallográfiai alrácsonkon való elhelyezkedését (atom location by channelling enhanced microanalysis, ALCHEMI) ásványi eredetű gránát kristályokban [7]).

A JEOL 3011-en PhD-program keretében fejlesztünk szemcsehatárok rácsfeloldású jellemzésére alkalmas módszert [6, 8], amit napelemek EU-projekt keretében történt fejlesztésében hasznosítottunk is. Már ezek a ma már kevésbé korszerűnek mondható TEM-ek (CM-20 és JEOL 3011) is megteremtették az alapot olyan adatfeldolgozó módszerek fejlesztéséhez, amikkel a különböző elektrondiffrakciós ábratípusokból mind több és több kvantitatív információt nyerhettünk ki. A nanokristályos anyagok gyűrűs diffrakcióiból (a röntgendiffrakciónál bevett Rietveld-módszerhez hasonló, saját fejlesztésű eljárással) a mintát alkotó fázisok mennyiségét és preferált orientációit határozzuk meg [9–11]. Az amorf anyagok diffúz diffrakciós gyűrűiből saját fejlesztésű programunk a párkorrelációs függvényt, az atomok távolságainak eloszlását származtatja [12]. Az egykristályminták döntési sorozatából származó pontdiffrakciós felvételek csoportját egységes adathalmazként kezeli programunk, egyértelműbbé téve a fázismeghatározást [13]. A konvergens sugaras elektrondiffrakcióval (CBED) nyert Kikuchi-ábrákból nemcsak az orientációt tudja programunk pontosabban meghatározni, de a szomszédos szemcsék orientációkülönbségét is [6].

A gyártó céggel való együttműködés [14] keretében három évre ingyenesen kölcsönkaptunk a JEOL 3011-re egy korlátozott pásztázást megvalósító drága precenziós feltétet, amivel ez alatt a 3 év alatt kristályszer-



2. ábra. Egy napelemet fejlesztő EU-projektben (HIGH-EF/FP7) készült nagykristályos Si-rétegben a szemcsehatárok és a minta felülete által bezárt szög eloszlása határtípusonként [5]. Jól látható, hogy a határfelületi energia hogyan befolyásolja a szemcsehatárok irányítottságát

zetük alapján tudtuk térképezni a nanokristályos anyagok fázisainak eloszlását és krisztallográfiai irányítotttságát. A kölcsön lejárta után saját fejlesztésben (már a 2018-ban beszerzett Themis mikroszkóp lehetőségeit kihasználva) valósítottunk meg ilyen vizsgálati módszereket (saját szoftver fejlesztésével).

Ezen pályázati sikerekre büszke volt Gyulai József, és tulajdonképpen inspirálták is, hogy egy korszerű kétsugaras (dual beam LEO 1540 XB) berendezés beszerzését vezesse. Az új (LEO, régebbi nevén Zeiss gyártmányú) berendezés egy korszerű téremissziós elektronágyúval (field emission gun, FEG) felszerelt pásztázó elektronszkóp és egy fókuszált ionsugarat (focused ion beam, FIB) használó pásztázó eszköz kombinációja. A körültekintő specifikációnak köszönhetően a berendezés sokféle anyag leválasztását tette lehetővé a benne levő gázbevezető rendszer (gas inlet system, GIS) segítségével, például mintázatok létrehozását akár elektronnyaláb, akár Ga-nyaláb segítségével. A túszerű Kleindick-manipulátorok a nanotechnológia és az elektromos mérések szolgálatába álltak. A LEO segítségével készültek FIB-lamellák Ga-ionos kivágással TEM-vizsgálatok céljára, de készültek mikrofluidikai eszközök is, pl. egy hordozható troponinérzékelőhöz.

Természetesen tudatában voltunk annak, hogy az úgynevezett aberrációkorrigált elektronszkópia sorozatgyártású terméké vált, és eljött az idő, amikor felkészültnek éreztük a csapatot ennek beszerzésére és telepítésére. Ezt mintegy öt évvel ezelőtt sikerült megvalósítani egy Thermo Fisher Scientific THEMIS 200F képkorrektors (image corrector) változatának beszerzésével. Amennyiben a gömbhiba-korrektort a képalkotó részbe szerelik, akkor a TEM-képalakítás felbontása javul meg jelentősen. (A másik lehetőség a nyalábkorrekciós, azaz probe corrected változat, ahol a nyalábformáló részben elhelyezett korrektor a STEM-felbontást javítja jelentősen.) A hexapólusos tagokat is tartalmazó korrektor kiküszöböli a hengersizmetrikus elektromágneses lencsék hibáit és képes az optikai tengelytől távolabbi sugarakat is ugyanabba a pontba fókuszálni. A szférikus aberráció nemcsak nullázható, hanem állíthatóvá válik. Ennek jelentősége annak elérhetőségében áll, hogy az átviteli függvényben a kontraszt nem vált előjelet, és így egy atomi felbontási képen tudhatjuk, hogy a fehér, vagy a szürke intenzitásponatok fedik-e az atomok helyét a kép bármelyik részén.

Lássuk hát a technikai paramétereket! A TEM-felbontás az Å (= 100 pm) alatti tartományban van. A garantált gyári felbontás 90 pm, mi gyakran mérünk 70 pm-t. STEM, azaz pásztázó üzemmódban (nincs probe corrector) 140 pm, tehát másfél Å alatt van. Ebben az üzemmódban sokféle detektorunk van, amiket akár szimultán is használhatunk. A legfontosabb kétségkívül a nagyszögű gyűrűs, sötét látóterű (high angle annular dark field, HAADF) detektor, aminek gyűrűjével a nagy szögben szóródott elektronokat detektáljuk. Ezek Rutherford-szórás szenvedtek, úgyhogy a kontraszt mono-

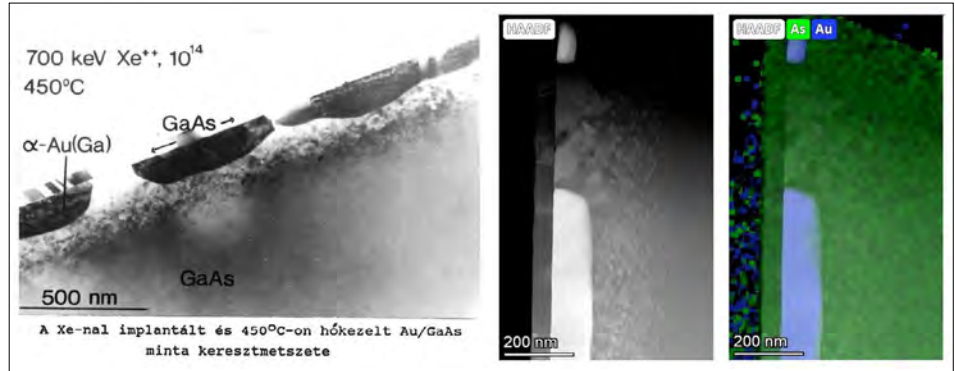


3. ábra. A THEMIS 200 képkorrigált mikroszkóp az EK MFA laborjában, ahol az elhelyezés megkövetelt műszaki paramétereit rezgésmentes alap, 30 nT-ra csökkentett szórt 50 Hz-es mágneses tér és rendkívüli hőmérséklet-stabilitás biztosítja (az oszlop mellett fél óránként 0,1 °C-ot változhat maximum a hőmérséklet)

ton növekszik a rendszámmal, pontosabban annak négyzetével. A nehezebb elemek a képeken nagyobb intenzitással jelennek meg, a könnyebbek szürkébbek

– ez önmagában segít a mintán történő tájékozódásban.

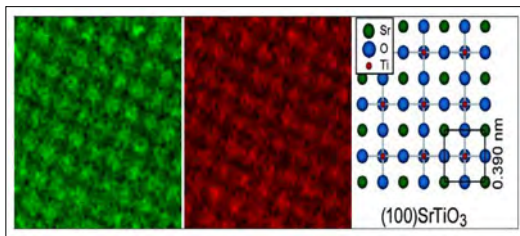
Ebben az üzemmódban használhatjuk az oszlopba beépített négy darab energiadisperziós röntgenspektroszkópiai (EDS) detektort, és úgynevezett spektrumképeket készíthetünk. A képek minden pontjában eltávolítjuk az EDS-spektrumot, így a feldolgozóprogrammal a kép egyes részeiből akár külön-külön is kinyerhetjük a



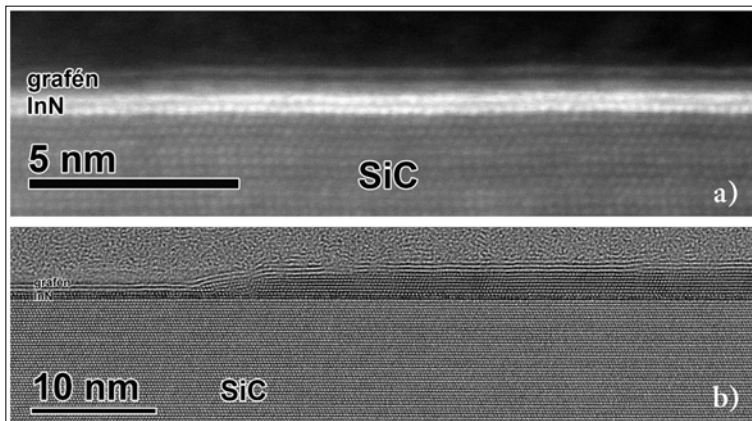
4. ábra. Egy világos látóterű TEM-kép a régi cikkből, középen az új mikroszkóppal készült HAADF STEM-kép Z kontrasztal, jobbra az egyes elem térképekből az arzén és az arany eloszlása egy képpen

tilag nem csökken lényegesen a korrektornak köszönhetően – mi is kimértük, hogy 80 keV-en is jobb mint 1 Å (<https://www.thinfilms.hu/results/>).

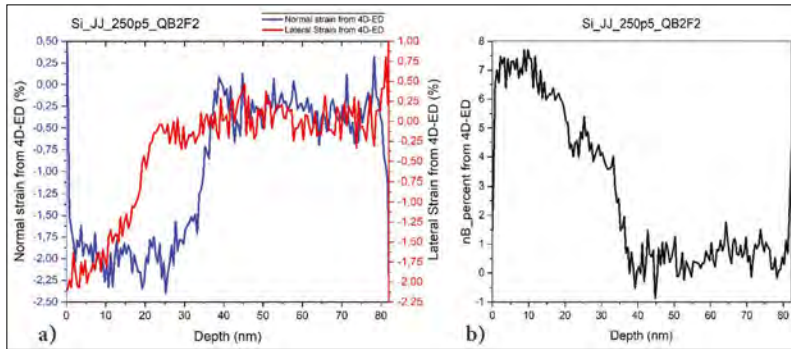
Visszatérve Gyulai Jóskához, egy régi, 1992-es, közös cikkünkben [15], egy úgynevezett ionsugaras keverési kísérletnek indult ionimplantációról írtunk. Az ionimplantáció az ő kedvenc területe volt. Egy kész, párolgatott Au-GaAs kontaktust semleges Xe-ionokkal implantáltunk, hogy az aranyból egy ötvözött kontaktust hozzunk létre. Meglepődve tapasztaltuk, hogy az implantáció keltette sok szemcsehatár mentén az arany a GaAs-be diffundált, ott nagy szemcséket alkotott, és a fölötte levő réteg egy folyamatos vékony GaAs-egy kristályként jelent meg. A sok-sokéves mintát sikerült 2018-ban megtalálni, és az új mikroszkópban most már elemeloszlási térképeket is készíteni, amiket a Gyulai József 85. születésnapjára rendezett szemináriumon bemutattunk. Meg is kérdeztük: Jóska, kellene ebből egy új cikket írjunk? Sajnos ez csak ebben az emlékszámban valósult meg.



5. ábra. A stroncium-, illetve titánalrác elem térképe SrTiO<sub>3</sub>-rácban. A THEMIS mikroszkóp elem térképezési lehetőségeit jól érzékeltetik ezek a képek, ahol a SrTiO<sub>3</sub>, Sr-, illetve Ti-alrácát külön-külön sikerült feloldani



6. ábra. a) STEM HAADF-kép, amely a tipikusan megfigyelhető két réteg InN-et mutatja a két réteg grafén alatt. b) Egy olyan TEM-kép, amely a ritkábban megfigyelhető 3D, azaz 6-7 atomsornyi InN-tartományokat is megmutatja. Ezekben az esetekben az InN köbös szekvenciában nőtt



7. ábra. a) A felülettel párhuzamos, illetve arra merőleges deformáció-összetevők mélységi eloszlása qubitfejlesztéshez készült, erősen bórral adalékolt szilíciumrétegben (Si:B). b) A Si-t helyettesítő helyen ülő bór koncentrációjának rugalmas deformációból számolt mélységi eloszlása. Ez a mélységi eloszlás lényegesen befolyásolja, hogy a rétegnek mely része lesz szupravezető, ha a kívánt alacsony hőmérsékletre (<1 K) hűtik. (Forrás: a SIQUOS projekt, ami az Európai Unió Horizon 2020 programjának QUANTERA konzorciumán belül valósult meg.)

egyetlen grafénréteget tartalmaz, de hidrogénben való hőkezelés hatására az ez alatt levő pufferréteg átalakul egy második grafénréteggé. Ezen a rétegen aztán az indium- és nitrogénatomok át tudnak jutni interkalációval, és a grafén és a SiC közti vékony reakcióterben létrejöhét a kívánt indium-nitrid [16]. A 6. ábrán a THEMIS mikroszkópban készült két kép mutatja ezt a réteget.

Publikált cikkünkben [16] sikerült meghatározni a kétdimenziós InN tiltott sáv szélességét is. Ez 2 eV-nak adódott a 0,7 eV-os tömbi érték helyett. A sáv szélességet egyébként az intézet egy másik erős mikroszkópos területe, a pásztázó tús STM (scanning tunneling microscope, pásztázó alagútmikroszkóp) szolgáltatta – a módszer fejlődéséről ugyanebben a számban egy másik cikk szól.

Az új gömbhiba-korrigált (Cs) Themis mikroszkópunk pásztázó feltéte és CMOS-kamerája lehetővé tette, hogy miközben a nanométeres átmérőjű, közel párhuzamos elektronnalábbal a minta egy téglalap alakú tartományán pásztázunk, a pásztázás közben felvett kép minden egyes pixelének megfelelő sugárpozícióban egy-egy teljes elektrondiffrakciós ábrát is rögzítsünk. Így a minta vizsgált területét megmutató, nagyszögű gyűrűs, sötét látóterű (HAADF) detektorral felvett képpel egyidejűleg a CMOS-kamera nagy számú (például 200×100 pixel esetén 20000 darab, egyenként 512×512 pixeles) elektrondiffrakciós felvételt is rögzít. Mivel a kétdimenziós pásztázott tartomány minden pozíciójához egy kétdimenziós diffrakciós felvétel tartozik, a módszert négydimenziós elektrondiffrakciós (egyes forrásokban 4D-STEM) módszernek nevezik. Az ilyen nagy adatsorokból történő információkinyerésre kétféle módszert is fejlesztettünk. Egyrészt nanokristályos anyagok fázis-, és orientáció-térképezésére használjuk [17]. Másrészt egykristálymintán belül, a lokális deformációt tudjuk vele mérni. Ez utóbbi módszert például egy qubit-fejlesztést végző EU projekt keretében hasznosítottuk [18].

Gyulai József mint intézetigazgató biztosította a mikroszkópos fejlesztésekhez szükséges pályázati lehetőségeket. Félvezetőfizikusként örömmel követte az

ilyen tárgyú EU-projektek. Reméljük ma is elégedett lenne az elért eredményekkel.

## Irodalom

- Gyulai J., Mayer J. W., Rodriguez V., Yu A. Y. C., Gopen H. J.: Alloying behavior of Au and Au–Ge on GaAs. *J. Appl. Phys.* 42, (1971) 3578–3585.
- Pécz B., Jároli E., Radnóczy G., Veresgyházy R., Mojzes I.: Pyramidal pit formation at the Au/GaAs interface during heat treatment. *Physica Status Solidi A* 94/2, (16 April 1986) 507–513. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210940209>
- Pócza J. F., Barna A., Barna P. B., Pozsgai L., Radnóczy Gy.: *Jpn. J. Appl. Phys.* 13 (1974) 525.
- Barna Á., Barna P.B., Radnóczy G., Sáfrán G.: *In-situ* UHV TEM study of the two-dimensional growth of Al<sub>2</sub>Au phase on Al(111) surface. *Ultramicroscopy* 15/1–2, (1984) 101–107.
- Lábár J. L., Pécz B., Radnóczy G., di Forte-Poisson M.A.: Domains of reversed polarity in 2H-GaN. *Electron Microscopy III.* (1998) 453–454.
- Kiss Á. K., Lábár J. L.: A method for complete characterization of the macroscopic geometry of grain boundaries. *Mater. Sci. Forum* 729 (2013) 97–102.
- Kovács-Kis V., Dódy I., Lábár J. L.: Amorphous and partly ordered structures in SiO<sub>2</sub> rich volcanic glasses. An ED study. *Eur. J. Mineral.* 18 (2006) 745–752. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0745
- Kiss Á. K., Rauch E. F., Pécz B., Szívós J., Lábár J. L.: A tool for local thickness determination and grain boundary characterization by CTEM and HRTEM techniques. *Microsc. Microanal.* 21/2, (2015) 422–435. DOI: 10.1017/S1431927615000112
- Kiss Á. K., Lábár J. L.: Determining projections of grain boundaries from diffraction data in transmission electron microscope. *Microsc. Microanal.* 22, (2016) 551–564. DOI: 10.1017/S1431927616000684
- Lábár J. L.: Electron diffraction based analysis of phase fractions and texture in nanocrystalline thin films. Part I: Principles. *Microsc. Microanal.* 14, (2008) 287–295.
- Lábár J. L.: Electron diffraction based analysis of phase fractions and texture in nanocrystalline thin films. Part II: Implementation. *Microsc. Microanal.* 15, (2009) 20–29.
- Lábár J. L., Adamik M., Czigány Zs., Fogarassy Zs., Horváth Z.E., Geszti O., Misják F., Radnóczy G., Sáfrán G., Székely T., Szüts T.: Electron diffraction based analysis of phase fractions and texture in nanocrystalline thin films. Part III: Application Examples. *Microsc. Microanal.* 18, (2012) 406–420. DOI: 10.1017/S1431927611012803
- Kovács-Kis V., Pósfai M., Lábár J. L.: Nanostructure of atmospheric soot particles. *Atmospheric Environment* 40 (2006) 5533–5542.
- Lábár J. L.: Consistent indexing of a (set of) single crystal SAED pattern(s) with the ProcessDiffraction program. *Ultramicroscopy* 103 (2005) 237–249.
- Lábár J. L., Das P. P.: Pattern center and distortion determined from faint, diffuse electron diffraction rings from amorphous materials. *Microsc. Microanal.* 23, (2017) 647–660. DOI: 10.1017/S1431927617000435
- Pécz B., Radnóczy G., Horváth Zs. J., Barna P. B., Jároli E., Gyulai J.: The effect of ion beam treatment and subsequent annealing on Au/GaAs contacts. *J. Appl. Phys.* 71, (1992) 3408–3413.
- Pécz B., Nicotra G., Giannazzo F., Yakimova R., Koos A., Kakanakova-Georgieva A.: Indium nitride at the 2D limit. *Adv. Mater.* 33, (2021) 2006660. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202006660>
- Lábár J. L.: DiffMap: A new free computer program to process scanned electron diffraction patterns. *Resolution and Discovery* 6, (2022) 7–11. <https://doi.org/10.1556/2051.2022.00090>
- Lábár J. L., Pécz B., van Waveren A., Hallais G., Desvignes L., Chiodi F.: Strain measurement in single crystals by 4D-ED. *Nanomaterials* 13, (2023) 1007. <https://doi.org/10.3390/nano13061007>

# AZ IONSUGARAS ADALÉKOLÁS ÉS ANALITIKA ALKALMAZÁSA A FÉLVEZETŐ-TECHNOLÓGIÁBAN, AVAGY, GYULAI JÓZSEF MUNKÁSSÁGÁNAK HATÁSA A KFKI-BAN ÉS UTÓDINTÉZETEIBEN

Battistig Gábor  
HUN-REN EK, MFA, Budapest

Gyulai József, a szakmában mindenki Jóska, meghatározó szerepet játszott a hetvenes évek közepétől a hazai szilíciumalapú fizikai és technológiai félvezető-kutatások, valamint az ionsugaras analitikai vizsgálatok alakulásában. Sokan vagyunk, akiknek kutatói, fejlesztői, vagy mérnöki pályája szorosan kapcsolódott Jóska tevékenységéhez.

A jelen írásban a terjedelmi korlátok és a szerző emlékezetének lyukassága miatt név szerint nem említek senkit, bár nagyon jól tudom, hogy nagyon sokan remek kutatók, tudósok, mérnökök és egyéb szakemberek dolgoztak Jóskaival együtt az évek során. Jóska gazdag életútja és munkássága, a rendkívül széles körű hazai és nemzetközi szakmai és baráti kapcsolatrendszere igen körültekintően dokumentáltak az általa nagy gonddal összeállított kötetben [1].

De hogyan is kezdődött? 75 éve, hogy John Bardeen, Walter Brattain és William Shockley először demonstrálták a félvezető tranzisztort, amivel elindították a mai napig szédületes eredményeket produkáló félvezetőforradalmat. Hatásuk megkérdőjelezhetetlen. De a félvezető-tulajdonságok már a XX. század elejétől foglalkoztatják a tudósokat. Gyulai Jóska a Szegedi Egyetemen végzőseként 1955-ben professzora, Budó Ágoston javasolta, hogy foglalkozzon a félvezetőkkel. Rövid középiskolai fizikatanári kitérő után a Szegedi Egyetemre kerülve vegyület-félvezetők fotoelektromos tulajdonságait tanulmányozta; aspiránsként ebből írta kandidátusi disszertációját is.

1969-ben, már túl a kandidátusi értekezésének benyújtásán egy egyéves amerikai ösztöndíjat kapott Budó Ágoston segítségével. A fogadókészséget viszont magának kellett megszereznie, ezért leveleket küldött a tudományos publikációkból ismert professzoroknak az USA különböző egyetemeire. Az első, aki pozitívan válaszolt James W. Mayer, a pasadenai California Institute of Technology

(Caltech) professzora volt. Jóska így jutott ki egy évre a Caltechre, és kapcsolódott be az ott folyó kutatásokba [1]. Ez az egy kutatói év egész életére és a KFKI-ban folyó ionsugaras és mikroelektronikai technológiai kutatásokra meghatározóvá vált.

A félvezető-technológia még nagyon gyerekcipőben járt a hatvanas évek legvégén és a hetvenes évek elején. A diszkrét félvezető diódák és tranzisztorok már gyakorlatilag átvették a vákuumcsöves elektronika helyét. Akkorra már demonstrálták az integrált áramkörök lehetséges előnyeit is. Az előállítási technológiák azonban még kiforratlanok voltak, nem igazán értették még a fizikai, technológiai folyamatok hátterét. A félvezető anyagok, s a belőlük épített szerkezetek, eszközök, áramkörök és a velük kapcsolatos egyéb technológiák kutatásába fizikusok, mérnökök és technológusok kapcsolódtak be. Az ipar felismerte a félvezetők fontosságát, ezért nagy nyomást helyezett a fejlesztések felgyorsítására.

A hatvanas évek második felében James W. Mayer csoportja egy, a magfizikusok által már „kinőtt” 3 MV gyorsítófeszültségű iongyorsítóval bombázta az anyagok felületét, tanulmányozta az ion-anyag kölcsönhatást. Az ionbombázás során a nagy sebességre felgyorsított ionok behatolnak az anyagba, és sorozatos ütközések által fokozatosan elvesztik energiájukat, majd megállnak. A félvezetőkre így bejuttatott ionok – lehetnek ezek adalékatomok – megváltoztathatják a félvezető anyag vezetési tulajdonságait. Ez a technológiai eljárás az ionimplantáció. Ugyanakkor a belőtt ionok egy nagyon kis része az anyag atomjaival ütközve visszapattan, nagyszögű szórást szenved, elhagyja az anyagot. Érzékelve ezen ionok mennyiségét és analízálva energiaeloszlásukat információt kapunk a céltárgy milyenségéről, anyagi összetételéről.

Ennek az alapvetően roncsolásmentes vizsgálati módszernek, ami később ionsugaras analitika néven vált széles körben ismertté és alkalmazottá, a hatvanas években felfedezett félvezető részecske-detektor használata adott nagy lökést. Szerencsés módon az ionimplantáció és az ionsugaras analitika az anyagnak ugyanabban a felületközelben módosítja, illetve vizsgálja az anyagi és szerkezeti tulajdonságokat. A szilíciumtechnológiában korábban diffúziós eljárásokat alkalmaztak a félvezetők helyi adalékolására. Az ionbombázás jelentőségét felismerve azonban ez az eljárás nagyon korán a félvezetők helyi adalékolásának gyakorlatilag kizárólagos hatékony módszerévé vált. Az ionimplantáció napjainkban is meg-



*Battistig Gábor villamosmérnök az MTA doktora. A KFKI-ban a félvezetők gyártástechnológiáival, elsősorban a kristályos anyagok ionimplantációja során bekövetkező rácskárosodásokkal és azok helyreállításának kérdéseivel foglalkozott. Majd az utódintézetben, a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben vezette a Mikrotechnológiai Laboratóriumot, melynek fő kutatási területe azóta is a szenzorrelvek kutatása, érzékelőeszközök tervezése, megvalósítása és alkalmazása, valamint a kapcsolódó technológiai eljárások fejlesztése. Jelenleg a Debreceni Egyetem Villamosmérnöki Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára.*

határozó a nagy bonyolultságú integrált áramkörök előállításai technológiái sorában.

Gyulai Jóska ekkor kapott lehetőséget és kapcsolódott be az egész tudományos életét meghatározó ion-anyag kölcsönhatás elméleti és gyakorlati kutatásaiba. Már korán felismerte a kutatásainak két szervesen összekapcsolódó, elválaszthatatlan aspektusát:

- Hogyan szerezhetünk ionbombázással információt az anyag milyenségéről, tulajdonságairól és szerkezetéről?
- Hogyan változtathatjuk ionbombázással meg az anyag tulajdonságait és szerkezetét?

Ez a két kérdés folyamatosan jelen volt tudományos pályáján, értelemszerűen a több mint 300 tudományos közleménye is ezekkel a kérdésekkel foglalkozik.

A Caltechen igen pezsgő tudományos munka folyt. Szerencsésen találtak azok a meghatározó tényezők, amelyek a sikeres kutatás-fejlesztés alapfeltételei.

- *Tudás* – nemzetközi kutatócsapat jött létre J. W. Mayer vezetésével fizikusokból, villamos- és vegyészmérnökökből, elektronika- és technológiafejlesztőkből és nem utolsósorban kiváló diákokból.
- *Technikai lehetőségek* – az egyetemi környezetben adott volt az iongyorsító berendezés, különféle anyagvizsgálati módszerek, valamint széles kooperációs háló a félvezetőeszközöket fejlesztő ipari partnerekkel.
- *Finanszírozás* – az Egyesült Államok-beli kutatásfinanszírozás az NSF-en (National Science Foundation) keresztül nagy hatékonysággal, kevés adminisztráció mellett működött.
- *Az eredmények hasznosulása* – az abban az időben kialakuló, jelentős, félvezetőeszközöket gyártó vállalatok erősen támaszkodtak a friss kutatási eredményekre, részt vettek közös projektekben, megbízásokat adtak a kutatóknak és adaptálták az alap kutatási eredményeket.

Jóska 1970-ben egyéves Caltech-tanulmányútja során jelentősen hozzájárult a J. W. Mayer vezette csoport sikeréhez. Ezt az is bizonyítja, hogy az egyéves munkájának eredményeként többek között nyolc elsőszerező tudományos publikációja született. Ezek között vannak olyanok, amelyek máig meghatározók akár az ionsugaras analitika, akár az ionimplantáció területén. Doktoranduszokkal, iparból jött munkatársakkal dolgozott együtt; az implantáció, az oxid- és nitridrétegek minőségének, a különféle szennyezők tulajdonságainak vizsgálatával foglalkoztak. Több közös munkája volt többek között a Fairchild Semiconductors (ebből vált ki és alakult meg később az Intel), a Bell Labs, a Hewlett-Packard és a Hughes Aircraft munkatársaival. A kutatások igazi hajtóereje az ipari érdeklődés volt és az eredmények azonnali átvétele a gyártásba.

A nagyon sikeres egy év hatására sikerült tető alá hozni egy hosszú távú együttműködést az NSF és a KFKI között. Ennek keretében több fiatal magyar kutató tölthetett egy-egy évet a Caltech laboratóriumában és folytathatták a Jóska által elkezdett kutatásokat. Jóskának is alkalma volt évente két hónapot kint töltenie, ezáltal is magasabb

szintre emelni a Caltech–KFKI ionsugaras együttműködést. A hetvenes években az együttműködés eredményeként sok jelentős eredmény született, amelyek máig részei a szilícium-gyártástechnológiának. A három legkiemelkedőbb eredmény [2]:

- Nagy energiájú könnyű ionokkal (H, He) bombázva a céltárgyat, a visszaszóródó ionok energiaeloszlása fontos információkat tartalmaz a céltárgy anyagi minőségéről. Tiszta anyagok esetében könnyen megállapítható az adott elem koncentrációjának mélységfüggése. Azonban vegyületek, keverékek esetében ez már nem mondható el. Jóska megoldotta a feladatot, és matematikai leírást adott a vegyületet alkotó elemek koncentrációinak arányára, pontos meghatározására. Tulajdonképpen ezzel az ionszórásos analízis kiértékeléséhez elengedhetetlen eljárással alapozta meg hírnevét a nemzetközi ionos közösségben.
- Integrált áramköröket és egyedi félvezetőeszközöket is csak tökéletes kristályszerkezetű szilícium alapanyagon – szeleten – lehet létrehozni. Azonban a kristálynövesztők akkoriban leggyakrabban a köbös kristályszerkezetű szilícium-egy kristály kétféle irányítottágú változatát, az ún. (111) és (100) orientációjú egy kristálylapkát állították elő. Az eszközgyártás is szinte véletlenszerűen hol az egyik, hol a másik orientációjú lapkán történt. Az ionimplantáció során az adalékatomok lefékeződésük közben a céltárgyban hibákat, rácsrendezetlenséget is létrehozhatnak. Az implantációt követő magas hőmérsékletű hőkezelés szerepe is kettős, egyrészt elektromosan aktív rácspozícióba juttatja az adalékatomokat, másrészt eközben visszaállhat az eredeti kristálystruktúra. Kimutatták, hogy az (100) orientációjú Si-egy kristály lapkán végzett implantáció és hőkezelés során gyorsabban és tökéletesebben áll helyre a kristálystruktúra, mint az (111) orientációjú lapka esetében. Ennek hatására azóta is gyakorlatilag csak (100) orientációjú szilíciumlapkákat használnak a félvezetőiparban.
- Egy kristályok implantációja (és az ionsugaras visszaszórásos vizsgálatok) esetében nagy valószínűsége van annak, hogy a beérkező ion a szabályos rendben elhelyezkedő atomok közötti térbe, az ún. csatornába érkezik, és ott folytatja szinte energiavesztés nélkül az útját. Ez a véletlenszerű jelenség jelentősen megváltoztathatja az implantált adalékatomok mélységi eloszlását és ezáltal az eszköz elektromos tulajdonságait. A csatornahatás jelenségének kiküszöbölésére az együttműködés keretében dolgozták ki a máig használt eljárást: első lépésben pl. Si-ionok implantációjával roncsolják, amorfizálják a Si-egy kristályt a megfelelő mélységig. Ezt követően ebbe az amorf rétegbe implantálják az adalékatomokat, ahol természetesen nem érvényesül a csatornahatás. A hőkezelés során az ún. szilárdfázisú epitaxiával visszánő a tökéletes kristálystruktúra, miközben az adalékatomok jól meghatározott mélységi eloszlása nem változik. Jelenleg is ez az előamorfizációs technológia az alapja az akár 3 nm csíkszélességű szilíciumtechnológiának is.

A hazai erős elméleti és gyorsító kísérleti alapok termékeny táptalajt jelentettek a külföldi tapasztalatokkal hazatérő Gyulai József úttörő félvezető-technológiai és analitikai kezdeményezései számára, ahogy ezt ő maga is részletesen kifejti önéletrajzi visszaemlékezésében [2]. Hazatérése után Jóska-t a KFKI-ba hívták az induló implantációs célprogramba [3]. Három fő pillére volt a programnak: az implantáció technikai feltételeinek megteremtése; félvezetőeszközök, integrált áramkörök tervezése és megvalósítása; és az ionsugaras analitika bázisának kiterjesztése [4]. A KFKI és későbbi utódintézetei ideális hely volt a programhoz: működött az 5 MV-os Van de Graaff-iongyorsító berendezés, egy szovjet ionimplanter, az ILU-3a telepítése volt akkoriban folyamatban, és az intézetben belül megvolt a gyorsító, ionsugaras, félvezetőfizikai és elektronikai elméleti tudás és kísérleti tapasztalat. Kormányzati támogatások formájában rendelkezésre állt a pénzügyi háttér is. Félvezető-kutatások folytak más, az iparhoz közelálló intézetekben, a Híradástechnikai Ipari Kutatóintézetben, a Távközlési Kutatóintézetben, a Műszaki Fizikai Kutatóintézetben, és volt félvezetőeszköz-gyártás is az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt.-ben. A részt vevő intézetek szakembergárdái között magas szintű kooperáció alakult ki a közös cél, a magyar félvezetőipar megteremtése érdekében. Adott volt tehát minden a sikerre.

A három terület eredményei már elég hamar elkezdtek mutatkozni. A nem igazán félvezetős célú szovjet ILU implanter telepítése után pár év alatt megtervezték és megépítették a saját fejlesztésű már kimondottan félvezetők adalékolására alkalmas SAFI implanter berendezést. A félvezetőeszközök tervezésének egyik csúcspontja volt, amikor az Intel 4004 mikroprocesszor mását sikerült legyártani. A munka azért volt jelentős, mert nem az amerikai gyártmányt másolták le, hanem a funkciók, utasítások ismeretében tervezték meg a kb. 2300 tranzisztort tartalmazó integrált áramkört. Kidolgozták a szükséges NMOS-gyártástechnológiai folyamatot, és legyártották a próbadarabokat. A működés megfelelt az eredeti áramkörnek. A rutinszerűvé váló ionsugaras analitika területén jelentős előrehaladások történtek mind új technikai megoldások bevezetésével, mind a kiértékelésekhez szükséges számítógépes programok kifejlesztésével. Rohamosan fejlődtek a komplementer anyagvizsgálati módszerek is, pl. az ellipszometria, az elektronspektroszkópia és a pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópia.

A nyolcvanas évek elején új szereplő lépett be, a Mikroelektronikai Vállalat (MEV), amelynek feladata már a félvezető integrált áramkörök tömeggyártása volt. A gyártás szovjet technológiára épült a gyár újpesti telephelyén – egy nyugati technológiai sor akkor elérhetetlen volt. Támaszkodva az igen képzett és sokoldalú szakembergárdára, a kutatóhelyekkel együttműködve meg is indult az integrált áramkörök gyártása Magyarországon.

1986. május 26-án reggel 6 órakor azonban tűz ütött ki a gyárban, és teljesen leégett a MEV gyártócsarnoka a berendezésekkel és az infrastruktúrával együtt [5].

A MEV-tüzeset következményei katasztrofális hatásának bizonyultak a kutató, fejlesztő háttérintézetekre, így a KFKI-ban működő, Jóska által vezetett mikrotechnológiai laboratóriumra és az ott dolgozó kutatókra nézve is. Egy csapásra megszűnt a sikeres K+F-hez szükséges ipari gyártói háttér, nem érkeztek már kutatási feladatok a gyártásból, és nem is volt már hova továbbadni a kutatási eredményeket. A szakemberek szétszéledtek, más területeken folytatták tevékenységüket. A tűz után és a rendszerváltás körül tetszhalott állapotba került a mikrotechnológiai kutatás a KFKI-ban is. A Gyulai-érában kiépült mikrotechnológiai laboratórium azonban megvolt, és pár lelkes kutató továbbra is próbált az addigi alkalmazott kutatások helyett alap kutatási irányokba fordulni.

Új területeket kellett keresni és találni, ahol a mikroelektronikai K+F-ben felhalmozott tudás a megváltozott körülmények között is hasznosulhat. A mikrotechnológiai eljárások nemcsak félvezetőeszközök, integrált áramkörök előállítására alkalmasak, hanem egy olyan eszközrendszer képeznek, amellyel a mikrométeres mérettartományban funkcionális anyagokból rétegszerkezetek és struktúrák hozhatók létre. A megtalált új kihívás az érzékelés lett. A fizikai, kémiai, biológiai jelek érzékelése a számítástechnika fejlődésével párhuzamosan egyre inkább a mindennapok részévé vált. A rendszerváltás után, az immár Anyagtudományi Kutatóintézetben és utódintézeteiben a mikrotechnológiai laboratórium esz-közparkján új szenzorok, funkcionális anyagok és szenzorstruktúrák kutatása-fejlesztése lett a fő irány. Először kalorimetrikus elven működő gázérezékelők működését demonstrálták, amelyet a pórusos szilícium mint funkcionális anyag felhasználása tett lehetővé. Ezzel egyidőben a tapintásérzékelés mikroszenzoros megvalósításának módszerét is kidolgozták egy 3D piezorezisztív mikroerőmérő chip fejlesztésével. Nemcsak a kisméretű érzékelőelemeket, hanem azok lehetséges gyakorlati alkalmazását is demonstrálták sok területen, a biztonságtechnikában, az autóiparban vagy akár orvosi biológiai feladatokban [6].

A lelkes csapat és sok diák munkájának, továbbá a kiterjedt hazai és nemzetközi kapcsolatoknak köszönhetően a mikrotechnológiai laboratórium feladatai és az elért eredmények is megsokszorozódtak. Jelentős bázis alakult ki a bioérzékelésben és mintakezelésben elengedhetetlen mikrofluidikai eszközök tervezéséhez és megvalósításához, amelyekben nagyon kis anyagmennyiségű folyadékok kezelése, egyes tulajdonságaik mérése oldható meg. A felhasználás széles körű, a gyógyszeripartól az orvosi biológiai alkalmazásokig terjed a skála. Ipari partnerek és hazai, valamint nemzetközi pályázati lehetőségek biztosítják mind a gazdasági hátteret, mind az eredmények lehetséges hasznosulását.

A mikrotechnológia a világban már a nanométeres vonalszélességeket ostromolja. A robbanásszerű technológiai fejlődés követése lehetetlen egy kutatóintézetben. Viszont jól átgondolt fejlesztéssel a technológiai sor kiegészíthető olyan berendezésekkel, amelyekkel újabb, speciális szerkezetek állíthatók elő. Az évek során a laboratórium

fejlesztései ebben az irányban történtek. Kiemelendő két eljárás, a mély reaktív ionmarás (deep reactive ion etching – DRIE) és az elektronsugaras litográfia (e-beam lithography – EBL) meghonosítása. A DRIE technológia a nagy felület–mélység–arányú háromdimenziós szilíciumszerkezetek kialakításához elengedhetetlen, alapja a mikrogepészetnek. A rajzolatok méretének csökkentésére pedig az elektronsugaras litográfia az egyik legjobb út. Ezzel az eljárással a mikrotechnológiai laborban elérhető vonal szélesség az általános 1 mikrométerről lecsökkenthető akár a 10 nanométeres tartományba. E témában együttműködve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Karával kvantumstruktúrák demonstrálása és vizsgálata zajlik. A mikrométer alatti mérettartományban is többféle érzékelő fejlesztése folyik, ilyen a piezoelektromos ZnO<sub>2</sub>-alapú erő- vagy tapintás-érezékelők meghonosítása is.

Az ionsugaras analitika fejlődése együtt indult az integrált félvezető-áramkörök kutatásával. Jóska a csatornahatással kombinált ionvisszaszórás (Rutherford-backscattering spectrometry – RBS) félvezető-technológiai kutatásokban való alkalmazásának úttörője volt. A KFKI-ban is lehetőség volt ennek a roncsolásmentes anyagvizsgálati módszernek az alkalmazására. A félvezető-technológia fejlődésével, az egyre kisebb méretek elérésével azonban az RBS mérés technika már nem volt egyszerűen alkalmazható, nincs meg már az eszköz-méretekhez illeszkedő laterális és mélységi felbontóképesség. A speciális kérdések megválaszolására mérési és mérésiértékelési „trükköket” lehet alkalmazni. Időközben nemcsak az ionsugaras analitikai eljárások, de a felhasználási területek köre is bővült. Új módszereket dolgoztak ki kis tömegszámú elemek (H, D és He) mélységi analizisére, nagyon kis anyagmennyiségek meghatározására, illetve egyes elemek nagy érzékenységgű vizsgálatára, továbbá mikronyalábok alkalmazásával nagy laterális felbontóképességű mérésekre. Számos egyéb eljárást is alkalmaznak mind a KFKI, mind a világ más ionsugaras analitikai laboratóriumaiban.

A fontos kérdések az anyagtudomány sok területéről érkeznek, de a biológiai minták vizsgálata is nagyon izgalmas kérdés. Két speciális területet említek meg, melyek nem szorosan a mikroelektronikához tartoznak. A művészeti tárgyak anyagösszetételének roncsolásmentes vizsgálatához meg kellett oldani a vákuumból a szabad levegőre kizozható ionnyalábot, hiszen a sokszor nagyméretű művészeti tárgyakról nem lehet vizsgálható mintát leválasztani, és nem helyezhető vákuumba. A radiokarbonos kormeghatározás, a manapság rutinszerűen használt eljárás szintén az ionsugaras anyagvizsgálatnak egy speciális területe; abból kinöve vált önálló vizsgálati módszerré.

A KFKI-ban, majd a Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézetben dolgozó ionsugaras analitikával foglalkozó csoportnak nemzetközileg is jelentős eredményei voltak és vannak sok területen. Ebbe beletartoznak berendezésfejlesztések, pl. a nyalábáram pontos mérésének meghonosítása, vagy az igen fejlett kiértékelő és szimulációs

programcsomag, az RBX megalkotása is. A sok ionsugaras módszerrel megoldott mérési feladat több területen, komplementer vizsgálati módszerként kapcsolódva más eljárásokhoz is sok szép eredményt hozott a nanoanyagok, nanostruktúrák, különleges elemek és szerkezetek vizsgálatában.

Gyulai József nagyon sikeres pályafutása két meghatározott fázisra osztható. Az első 10–15 évben a félvezető integrált áramkörök technológiai problémáinak megoldására fókuszált. Ebben a szakaszban a Caltech-en és a KFKI-ban a fő kutatási területe az ionimplantáció elmélete és gyakorlata, valamint az ionsugaras analitika félvezető alkalmazásai voltak. Vonzáskörzetében, a KFKI-ban és utódintézményeiben, valamint a kooperáló kutatóintézetekben, egyetemi tanszéken és ipari partnereknél kialakult egy széles körű tudással rendelkező, sokszor informálisan szerveződő csapat, amelynek tagjai meghonosították, fejlesztették és alkalmazták ezeket az eljárásokat, technikákat. A közös cél a hazai félvezetőipar létrehozása és támogatása volt. Az időközben megváltozott körülmények arra kényszerítették Jóska-t és a hozzá közelálló szakmai kört is, hogy az addig felhalmozott tudást olyan területeken alkalmazzák, ahol jelentős tudományos eredmények érhetőek el. Jóska igen magas szakmai tudása, nemcsak a közvetlen szakmai kérdésekben meglevő tájékozottsága, a képessége arra, hogy a világban zajló folyamatokat átlássa, és nem utolsósorban embersége és barátsága sokunk szakmai pályafutását alapjaiban befolyásolta, irányította – nem erőszakosan, hanem a lehetőségek felvázolásával. Ötletei és folyamatos kíváncsisága olyan érdekes munkákat is eredményeztek, mint a Farkas Bertalan 1980-as űrrepülése során végrehajtott, Jóska által javasolt vegyületfélvezető-kristálynövesztési kísérlet gravitációmentes környezetben.

Jóska szakmai és emberi kvalitásait a nemzetközi szakmai közösség, a kutatók és az ipari szakemberek egyaránt elismerték. Máig ő az egyetlen a szakmai körben, aki konferenciaelnökként megrendezhette mind a három legnagyobb ionsugaras konferenciát: az Ion Beam Modification of Materials (IBMM); az Ion Beam Analysis (IBA) és az Ion Implantation Technology (IIT) nemzetközi tudományos fórumokat. Mi több, ő volt 1978-ban az IBMM konferenciasorozat elindítója is.

\* \* \*

Emlékét a KFKI telephely 26. épületében emléktábla és munkatársainak emlékezete őrzi.

## Irodalom

1. Gyulai József, Ifjan-éretten-éltesen – 80 kérdés-válasz közel nyolc évtizedről – Beszélgetőtárs Tóth László, Kiadó: Technika Alapítvány, 2012, ISBN 978-963-08-4355-3
2. Gyulai József, A Rutherford-visszaszórás és implantáció alkalmazása félvezetőrétegekre. Doktori értekezés, Budapest, 1978
3. Szókefalvi-Nagy Zoltán, Ott fenn a hegyen – Emlékezés Keszthelyi Lajosra, *Fizikai Szemle* 2023/3, 90 o.
4. Jéki László, KFKI, Arteria Studio, 2001, ISBN 963 008942 4
5. <https://jogalappal.hu/mikroelektronikai-vallalat-fustbe-menterv/>
6. MFA-évkönyvek 2004–2022. <https://www.mfa.kfki.hu/yearbooks/>

# EMLÉKEIM KRAUSZ FERENC ÚTJÁRÓL A NOBEL-DÍJIG – II. RÉSZ

Ferencz Kárpát  
Optilab Kft., Budapest

## A csörpölt tükör

Minél rövidebb időben egy lézerimpulzus, spektrálisan annál szélesebb. Minél szélesebb az impulzus spektrálisan, annál inkább fellép egy nem kívánt hatás: a közegbeli fénysebesség hullámhossztól való függése miatt az impulzus frekvenciakomponensei eltérő sebességgel fognak terjedni, ezért a terjedés során időben egyre inkább ki fog szélesedni az impulzus. Normális diszperzió esetében a rövidebb hullámhosszú részek lassabban, a hosszabb hullámhosszú részek gyorsabban terjednek. Egy lézerrezonátorban mindennek van diszperziója: minden optikai elem üveghordozójának és a rajtuk lévő optikai bevonatoknak, magának az aktív közeg zafirkristálynak és szokásos esetben a rezonátorban lévő levegőnek is.

Törekedtünk minél kisebb diszperziójú üvegeket használni, ha az elemen átmegy a fény – ez általában a szintetikus Suprasil 1 kvarcüveg lett. Minden hagyományos sokréteges bevonatot (zárótükör, becsatolótükör, nyitótükör, antireflexiós bevonatok a nyitótükörön és a kompenzáló éken) törekedtem nagyon kis diszperziójúra csinálni a 785 nm centrális hullámhossz körüli  $\pm 80$  nm széles sávban. Általában Suprasil 1 kvarcüvegből készített nagy méretű, Brewster-szögben használható prizmapárokkal próbálták kikompenzálni a diszperziót – Pista is gyártott ilyeneket – azonban ez csak részlegesen volt hatásos, viszont jelentősen megnövelte a rezonátor hosszúságát, és erősen instabillá tette azt. Ezek a prizmak nagyon drágák voltak, továbbá a másodrendű diszperzió részbeni kompenzálása után egyre inkább számított a harmadrendű diszperzió.

Feri számára világossá vált, hogy egy olyan „csodatükörre” van szüksége, ami veszteségmentesen reflektálja a zafirkristály fényét a teljes lézererősítési tartományban



Ferencz Kárpát okleveles fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai Intézetének nyugdíjasa, ahol 38 éven keresztül vezette az Optikai Vékonyréteglabort. Jelenleg az Optilab Kft. ügyvezetőjeként, a vállalkozás és az intézet közötti szerződés alapján dolgozik ugyanott. Kutatja, fejleszti és gyártja az ultrarövid impulzusú lézerek optikáit.

(egy kb. 200 nm széles sávban), és ugyanilyen sávszélességgel negatív csoportképletelési diszperziója (GDD) is van a visszaverődésnek. Kiszámította adott áteresztőképességű nyitótükör esetében – ami eleinte néhány százalék volt – az aktív közeg kristályon történő többszörös fényáthaladás által okozott eredő pozitív diszperziót és arra gondolt, hogy egy két darab „csodatükörből” kialakított tükörpár felületein történő többszörös reflexióval kompenzálni lehetne ezt. Feri mérnöki szemlélete újra fontos volt.

Ezt ismét egy péntek délután tárgyalgattuk. Ekkor jutott Szipőcs Robi az eszünkbe: ez komoly feladat lenne neki. Robi ekkor már sikeresen megvédte a doktori értekezését a BME-en, nagyjából a rétegtervező program is készen volt, és akkortájt valami MOM-os spektrométerfejlesztésbe kapcsolódott be, aminek a MOM felszámolása miatt hamar vége lett, ezért volt némi szabad ideje. Magunkhoz hívtuk őt, és Ferivel kettésben elvonultak az alagsori laborból Robi emeleti szobájába átbeszélni a feladatot. Szipőcs Robi nagyon szorgalmas munkatársunk volt, és Ferihez hasonlóan egy bulldog szívósságával tudott dolgozni a kapott feladaton. A szakirodalomból ismertük a Gires–Tournois-interferométert, ami egy nagyon aszimmetrikus Fabry–Perot-interferométer vékonyréteges formában, és amiben a spacer réteg (ami egyetlen vastagabb réteg, a „distance”) egy igen nagy reflexióképességű és egy köztes reflexióképességű (jellemzően 38%) tükröt választ el egymástól. A tükör teljes reflexióképessége továbbra is nagy, azonban a centrális hullámhosszon bizonyos sávzélességgel a reflexió csoportképletelés-diszperziója negatív. Ezt a megoldást alkalmazta Juhász Tibor a foszfátüveges lézerében, mert az így kapott negatív diszperzió elegendő volt a pozitív diszperzió kompenzálására 100 fs-nál nem rövidebb lézerimpulzusok esetében.

A Ti:zafir-lézerben azonban sokkal szélesebb spektrumban kellett negatív diszperziót kialakítani, ezért a Gires–Tournois-interferométer klasszikus formájában nem volt használható. Több mindennel is próbálkoztunk, például a Fourier-szintézis módszerével kiszámított folytonosan változó törésmutató-eloszlású bevonat kísérleti megvalósításával az általam korábban kidolgozott „flip-flop” technikával. Ennek az a lényege, hogy a kis ( $\text{SiO}_2$ ) és nagy ( $\text{TiO}_2$ ) törésmutatójú anyagokból a fény hullámhosszánaál lényegesen vékonyabb elemi rétegekből

építjük fel a bevonatot oly módon, hogy szisztematikusan változtatjuk a két komponens arányát. A bevonat a bejuto fényre így folytonosan változó törésmutatójú közegként hat és a profil alkalmas kialakításával negatív diszperziójú tükrök is készíthető. Robi és Kőházi-Kis Ambrus terveztek ilyen bevonatot, én Vona Andrással két napig párolgattam. A kísérlet nem volt sikeres, mert Feri lézere el sem indult a tükrök túl nagy fényszórási vesztesége miatt. Világossá vált, hogy a „csodatükröt” hagyományos optikai vastagságú rétegekből kell megcsinálni, és a rétegszám maximum a kétszerese lehet egy hagyományos negyedhullámú zárótükrőnek, hogy működőképes legyen a tükrökompENZált Ti:zafir-lézer.

Ekkor segítségünkre sietett az amerikai Fred Goldstein elég eldugott publikációja: „Experiments in thin film optimization procedures” (*Optical Interference Coatings, 1988 Technical Digest Series*, 6, 398–401, Optical Society of America, Washington, 1988), amiben az általa fejlesztett FilmStar™ program teljesítőképességének illusztrálására egy olyan 26 réteges TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> bevonatot mutatott be, ami 2% áteresztőképességgel szélessávú nyitótükrőként alkalmazható 700–1000 nm tartományban. Robi ebből kiindulva alkotta meg az első „csodatükröt”, ami egy 41 rétegből álló TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> bevonat volt, használható reflexióképességgel és széles sávú negatív GDD-vel rendelkezett, és működési elve okán csörpölt tükrőnek neveztük el. Elkészítettem a megtervezett tükröt, és gyorspostával küldtem Bécsbe Ferinek és Robinak, akiktől hamarosan megjött a jó hír, hogy az új tükrőpárral prizmák nélkül működik a lézer. Itt eltekintek a részletek leírásától, mert ezt Szipőcs Robi megtette már az ő írásában. Évekkel később, amikor a Macleod-féle programmal terveztem negatív diszperziójú tükröket, megállapítottam, hogy a programban alkalmazott Optimac eljárás használatakor nagyon fontos a kiindulási rétegszám alkalmas megválasztása.

Az angol chirp szó csipogást, csicsergést jelent és a radartechnikából ered. A csörpölt jel olyan jel, amiben a frekvencia idővel növekszik vagy csökken. A radartechnikusok segítségével a visszavert radarjeleket hangjelekké alakították, hogy könnyebben érzékeljék azokat, és ők nevezték el a jelenséget csicsergésnek e hanghatás miatt. Ez a jelenség az optikai szálás átviteli technikában is ismert, és fontos szerepe van az ultrarövid lézerimpulzusok erősítésében (chirped pulse amplification) – ezért Gérard Mourou és Donna Strickland 2018-ban kaptak Nobel-díjat. A mi csörpölt tükrünk működésének az a fizikai mechanizmusa, hogy a fény lassabban haladó (rövidebb hullámhosszú) komponensei kevésbé hatolnak be a rétegszámrendszerbe és abban rövidebb ideig tartózkodnak, amíg a gyorsabban haladó (hosszabb hullámhosszú) komponensei mélyebben behatolnak és a rétegszámrendszerben hosszabb ideig tartózkodnak. Ezáltal kompenzálódik a diszperzió miatti kiszélesedés. A Nobel-előadás már említett diájának bal felső sarkában lévő ábrán szemléltette Feri a tükrő működését. Megjegyzem, a földi élet sok millió évvel a mi publikációnk előtt már felfedezte a csörpölt

tükröt a rovarok számára. A kisebb törésmutató-különbség miatt több száz rétegből álló csörpölt tükrök vannak egyes bogarak kitingpáncélján szaporodási vagy hőháztartás-szabályozási okokból. A Wikipedia példaként az ékszerszkarabeusz-bogarakat említi, amelyek a bevonatot alkotó rétegek vastagságsorozatának megfelelően gyönyörű arany vagy ezüst színben pompáznak. Egy biológiai szakfolyóiratban találtam egyszer egy közleményt a bogarak csörpölt tükreiről, amiben elektronmikroszkóppal meghatározták a rétegvastagságok sorozatát, ami ugyanazon szabály szerint változott, mint a Robi programjával megtalált változatokban. A rovarok fotonikai struktúráiról Serge Berthier írt egy nagyon szépen illusztrált könyvet („Iridescences. The Physical Colors of Insects” Springer, 2007), amihez az optikai vékonyréteg-tudomány másik atyja, Florin Abeles írt előszót.

Szipőcs Robi fehér fényű interferométert épített az elkészített tükrök diszperziós tulajdonságainak mérésére, hogy lézerebeli használatra csak a sikerült darabokat adjuk tovább. Ez nagyon fontos volt, mert a csoportkésleltetés-diszperzió nagyon érzékeny az egyes rétegek vastagságainak hibáira. Sajnos a mi BAK560 gépünk ebből a szempontból nem volt a legjobb, ezért minden csörpölt-tükrő-párolgatás különös gondosságot igényelt. Az első tervek olyanok voltak, hogy a GDD-spektrum az utolsó réteg vastagságától erősen függött, ezért azt csináltuk, hogy az utolsó előtti réteg párolgatása után kinyitottuk a vákuumkamrát, kivettünk egy tükröt, Robi lemérte, és az eredmény alapján újraszámolta az utolsó réteg vastagságát. Másnap visszatettem a gépbe a tükröt, és rápárolgattam az utolsó réteget is. Ez javított a kihozatalon. Később áttértünk a háromféle anyagból álló csörpölt tükrök készítésére: az alsó rétegszámrendszer továbbra is TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> volt, amire egy Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> multiréteg került. Ez azért volt fontos újítás, mert a tantál-pentoxidból kisebb veszteségű és ezért nagyobb lézeres roncsolási küszöbű rétegek növeszthetők, mint a titán-dioxidból. Mivel lelevegőzés után a Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rétegek fényelnyelők, a megfelelő minőséghez azonnal hőkezelnünk kellett a tükröket az általam kifejlesztett gyors temperálási módszerrel, hogy az atmoszferikus nedvesség ne tudja megtölteni a rétegekben lévő pórusokat.

Emiatt sokat futkostunk a laborban: kiszedéskor azonnal meleg szárítószekrénybe tettük a párolgatási számszámokat, amelyek általában 6 db 25,4 mm átmérőjű, 6,35 mm vastag, sík-sík N-BK7 hordozót tartalmaztak, majd a meleg számszámokkal egyenként siettünk a gyors hőkezelő készülékhez, amiben 1 perc alatt névleges 500 °C-ra (feketített termoelemmel mért érték) melegítettük a tükröket, és 2 percig ezen a névleges hőmérsékleten tartottuk, majd 1 perc alatt fokozatosan csökkentve a használt halogén ceruzaizzók fényét lehűtöttük. Az alkalmazott hőkezelésnek több előnye is volt a szokásos kemencés módszerrel szemben. Egyrészt a kemencében a hősokek veszélye miatt nem elég gyors a felfűtés, ezért ezt mi még kihűlés előtt gyorsan elvégeztük. Másrészt a ceruzalámpák közeli infravörösben lévő

emissziós maximuma miatt nagyon hatékony a hőközlés az abban a tartományban erősen abszorbeáló bevonattal; a rövid időtartam miatt pedig nem mennek végbe diffúziós folyamatok és átkristályosodás az amorf oxidrétegekben, és ezért a fényszórási veszteség nem nő meg. A bevonatok legtöbbször összeropedeztek a megnövekedett mechanikai feszültség miatt, ha átnedvesedtek.

Ezzel a technológiával több éven keresztül mi láttuk el Krausz Ferit Bécsben, Maxim Psenyicsnyikovot Groningenben, Gérard Mourout Michiganben (CUOS), az olasz kollégákat Milánóban (Polimi) és még sok mindenki mást csörpölt tükrökkel. Kipróbálásra a világ első lézergyártója, a kaliforniai Spectra-Physics cég is vásárolt egy adaggal. A csörpölt tükrös és a csörpölt tükrös Ti:zafir-lézer szabadalmi védettséget nyert Magyarországon és az Amerikai Egyesült Államokban, a legtöbb nagy lézergyártó hazájában.

Bánatomra 1996-ban Feri és Robi együttműködése megszakadt. Ferinek nem volt más választása, mint megvásárolni azt a kereskedelmi programot, ami akkor a leginkább használható volt, és felvenni egy tehetséges diákot, aki újra megoldja a feladatot. A program az amerikai Tonny Noe „TFCalc” nevű programja, a diák a bukaresti Gabriel Tempea (továbbiakban Gabriel) volt. A program egy új eljárással, az ún. tűmódszerrel optimalt (needle-like optimization), de a csoportkélesztés-diszperzió nem volt megadható célfüggvényként. Ezt Gabriel hozzáírta a programhoz, amit két felhasználás opcióval vásároltak meg, és föltelepítette az én otthoni 486-os pc-mre is. Megadtam Gabrielnek az én törésmutató-diszperziós tábláimat, és ő Bécsben nekiállt tervezni. Az eredményeket az én otthoni faxomra küldte, amiknek a jósgát és gyárthatóságát leellenőriztem a saját gépemmel.

Évekig így dolgoztunk ketten. 1996 és 2004 között (a TUW-együttműködés végéig) összesen 18 használható rétegtervet készítettem, amelyek alapján összesen 117 párologatási ciklusban készítettem nagyon sok diszperzív lézertükröt. Gabriel első tükrötterve a „VLVNB40” fájlnevet kapta, és egy 45 réteges  $\text{TiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$  bevonat volt, aminek  $-60 \text{ fs}^2$  volt a reflexiós GDD-je a 710–910 nm-es tartományban. Megcsináltam, és gyorspostával ismét elküldtem Ferinek Bécsbe – és a lézer megfelelően működött Gabriel tükreivel is. A sok párologtatási ciklus nagyobb részével az ekkor már működő Femtolasers Produktions GmbH céget szolgáltam ki. A GDD-spektrum oszcillációit úgy simítottuk ki, hogy a hordozókat kétféle pozícióban tettem be a hordozótartó kalottára: „süveg” pozícióban (short) és „lógatott” pozícióban (long), ami néhány centivel eltérő hordozó-gőzforrás-távolságot jelentett. Ezt a távolságkülönbséget úgy választottam meg, hogy a két tükröcsapat között akkora optikaivastagság-különbség legyen, hogy a GDD-oszcillációik ellenfázisban legyenek, azaz két ilyen tükrök kombinálásával kisimuljanak az eredő GDD-függvény oszcillációi. Ezt az egész világon ma is így csinálják.

Herbert Walter professzor nyugdíjba menetele okán megüresedett a garchingi Max Planck Kvantumoptikai

Intézet (MPG MPQ) igazgatói pozíciója, amit Krausz Feri sikeresen megpályázott, és elnyert 2003-ban. Ezzel párhuzamosan megbízták a müncheni Lajos Miksa Egyetem (LMU) Kísérleti Fizika Tanszékének a vezetésével is. Jelenleg is betölti mind a két pozíciót. Az intézetet az elképzelései szerint Feri modernizálta, a kutatási programokat megújította (mások is nyugdíjba mentek), és három olyan rétegnövesztő csúcsberendezés telepítésével alakított ki laboratóriumot, amelyekkel a korábrinál sokkal pontosabban és reprodukálhatóbban lehetett csörpölt tükröket növesztetni. A laboratórium részére minden szükséges mérőműszert is megvásároltak a német állam pénzügyi támogatásából. Később az LMU és az MPQ közösen megalapították az Ultrafast Innovations GmbH nevű céget különféle csörpölt és más speciális lézertükrök gyártására, amelyeket újabban az amerikai Edmund Optics cég forgalmaz világszerte.

## Világcsúcs és attotudomány

Együttműködésünk tetőpontja az a kísérlet volt, ami az olasz (Milano), az ausztriai (Bécs) és a magyar (Budapest) kutatók összefogásával történt, és 1997-ben publikáltuk. Ezt mutatta be Krausz Feri külön dián a Nobel-előadásban feltüntetve a társszerzők fényképeit is, valamint hivatalos indoklásában külön bekezdést szentelt neki a Nobel-bizottság is. Ez a cikk a következő: Nisoli M, De Silvestri S, Svelto O, Szipőcs R, Ferencz K, Spielmann Ch., Krausz F: Compression of high-energy laser pulses below 5 fs. *Optics Letters*, 22, (1997) 522–524.

Jelenleg a cikk nyilvános idézeteinek száma 1021, amiből 894 független hivatkozás. Egy 2017-es összeállítás szerint ez a cikk az *Optics Letters*-ben publikált és legtöbbet idézett cikkek sorában a 23. volt. A TU Wien adta a lézert, a Polimi adta azt a nemesgáztöltésű, üreges magú optikai szálát tartalmazó cellát, amiben a bemenő lézerimpulzus „összerendezése” történt nemlineáris kölcsönhatásban, az MTA SZFKI adta a szükséges csörpölt tükröket. Kriptontöltéssel sikerült 4,5 fs, argontöltéssel 5 fs hosszúságú, közel egyciklusú és magas felharmonikus impulzusok keltéséhez szükséges energiájú lézerimpulzusokat kelteni, ami nem mellékesen világcsúcs is volt. Feri bécsi csoportja ugyanabban az évben sikeresen generált 300 eV levágási energiáig terjedő magas harmonikusokból álló spektrumot. Ezzel minden feltétel adott volt a kísérleti attotudomány megteremtéséhez szükséges izolált attoszekundumos XUV (kemény ultraibolya) impulzusok előállításához, amit Krausz Ferenc sikeresen tett meg 2001-ben csoportjával Bécsben, és a Nobel-bizottság 2023-ban fizikai Nobel-díjjal jutalmazott Anne L’Huillier-vel és Pierre Agostinivel megosztva.

## Tudomány és üzlet

A kilencvenes évek elején nemcsak politikai, de gazdasági rendszerváltás is történt Magyarországon, ami minket, kutatókat is megérintett. Neutronfizikus tudóstársaim-

mal (Cser László, Kaszás György, Mezei Ferenc és Rosta László) 1991 nyarán megalapítottuk a Mirrotron Kft.-t Mezei Ferenc találmányának, a neutron-szupertükörnek a gazdasági hasznosítására (vannak hasonlóságok a szupertükör és a csörpölt tükrök között, csak a hullám anyaga más). Közvetlen kollégáimmal 1991 novemberében optikai bevonatos tudásunk hasznosítására megalakítottuk az Optilab Kft.-t, aminek néhány éves külső támogatása után Kovács István és Krausz Ferenc is tényleges tagjai lettek 2000-ben. Feri a megtakarított osztrák fizetéséből adott nekünk pénzt használt gépek és anyagok vásárlására a MOM felszámolásakor. Sikerei beindulása után Bécsben sok vendég látogatta meg a laborját, és természetesen megkérdezték, hogy kik csinálták a speciális optikákat. Megadta az elérhetőséget, így egymás után jelentkeztek az érdeklődők. Ez volt a legjobb reklám, és felkerültünk a világ térképére.

Az első tükrökompensált lézer megépítése után Feri egy újabb vállalkozás megalapítását határozta el a lézer-oscillátorok forgalmazására eleinte csak építőkészlet formájában (építsd meg a saját femtoszekundumos lézert), majd teljes kiépítettségben. Ezt a céget Christian Spielmann és Andreas Stingl kollégáival együtt hozták létre 1995-ben Stingl OEG néven (Az OEG egy kisvállalkozási forma volt akkor Ausztriában), majd Femtolasers Produktions GmbH néven 1997-ben átalakították korlátolt felelősségű társasággá. Ez a cég változó sikerekkel működött egészen 2015. február 11-ig, amikor kivásárlással az amerikai Newport Corporation része lett. 2016. december 31-i dátummal a Femtolasers beolvadt az ugyancsak amerikai tulajdonú, ausztriai (Rankweil) High Q Laser GmbH-ba – ez 2017. augusztus 27-én emelkedett jogerőre, és a Femtolasers megszűnt létezni.

Nemsokára a teljes Newport vállalatbirodalmat az ugyancsak amerikai és a félvezetőiparból ismert MKS Instruments Inc. cég vásárolta fel (megvették az összes részvényt). Megszűnéséig a Femtolasers minden olyan elemet az Optilab Kft.-től vásárolt, amit mi képesek voltunk megfelelő minőségben legyártani; sokmindent közösen fejlesztettünk is ki. Néhány példa: kis diszperziójú, szélessávú antireflexiós bevonatos ablakok és ékek; kis diszperziójú, szélessávú nyalábosztók; kis diszperziójú, nagy reflexiójú dielektrikumtükrök; kis diszperziójú dikroikus (becsatoló) tükrök; kis diszperziójú nyitó (kicsatoló) tükrök; kis diszperziójú, megnövelt reflexiójú (enhanced) ezüsttükrök; diszperzív tükrök (GDD- és TOD-kompensátorok – TOD: third-order dispersion); kis diszperziójú, védett BBO lapkák autokorrelátorokhoz (0,012 mm vastagságtól); vékony kvarcüveg ékek a diszperzió szabályozására.

Ez utóbbiból az egész világon azért használnak 2° 48' ékszőgű Suprasil 1 ékeket, mert annak idején a MOM fel-

számolásakor az ehhez szükséges ékszerszám-készletet sikerült megvásárolnunk. Megnéztem az Optilab beszámolóiban, hogy 2004 és 2017 között összesen 3260266 euró értékben exportáltunk optikai elemeket a Femtolasernek. Együtt húsz év alatt legyártottunk összesen kb. ezer darab femtoszekundumos lézert, zömmel a világ tudományos kutatóhelyei számára. Tükrünk az összes kontinensen és a világ majdnem minden országában ott vannak. Nem sokkal a Femtolasers végnapjai előtt részt vettünk a csehek ELI-projektjében is a HALPS (High Repetition Rate Advanced Petawatt Laser System) rendszer „front-end” lézer rendszeréhez szállított FEMTOPOWER™ lézerek gyártásában, amit a többi részegységgel együtt a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumban (LLNL, USA) tanúsítottak és építettek össze.

Teljesen nem veszítettük el ezt a piacunkat, mert a Newport egyes termékeinkből 2018-ban egy „Femto-optics” névre keresztelt márkanevet nyitott az internetes áruházában, és a piaci igényeknek megfelelően árusítja azokat. Ez a semminél több; de kevesebb, mint a Femtolasers legjobb éveiben volt.

Néhány éve a Femtolasers két volt távol-keleti munkatársa, Tuan Le és Ming Yang alakítottak Viulase GmbH néven egy új céget Bécsben egy általuk kifejlesztett, csak lézerdiódákkal pumpált kompakt femtoszekundumos lézer gyártására. Ehhez néhány fontos rezonátortükröt mi szállítottunk, és az idei müncheni lézerkiállításon szépen szerepeltek vele (jelölve voltak a kiállítás díjára). A Tenacity 15 névre keresztelt lézerük jelenleg a világ legkompaktabb Ti:zafir-lézere, az impulzusok 15 fs-nál rövidebbek, a készülék elektromos teljesítményfelvétele csak 90 W, tömege kisebb 18 kg-nál. Jelenleg is gyártunk kicsatoló tükröket a Viulase cégnek. Lehet, hogy elkezdődik egy új történet?

## Epilógus

Krausz Ferinek ezúttal is tiszta szívemből gratulálok, további sikereket és jó egészséget kívánok. Remélem olvasóim megértik, miért született ez az írás: be akartam mutatni a jó példát. A célt jól kell megválasztani, és akár milyen kanyargós is az odavezető út, soha nem szabad feladni. Lehet külföldre menni kutatni, de az iskolához és az első hazai kutatótársakhoz fűződő kapcsolatokat őrizni és ápolni kell. Egyáltalán nem igaz az, hogy Krausz Ferenc Nobel-díja nem magyar díj – ahogy egyes újságírók sugalmazták – mi alaposan kivettük a részünket a közös munkából, ezért egy kicsit Szipőcs Róbert, Kovács István és Ferencz Kárpát is a magáénak érezheti. És ugyanígy érezhet Mauro Nisoli, Sandro De Silvestri és Orazio Svelto is. Mert nagyon fontos a barátság és a hűség.

Budapest, 2023. december 31.

# fizikaiszemle.eft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

## A HUMOR A FIZIKAOKTATÁS SZOLGÁLATÁBAN

Beszeda Imre, Stonawski Tamás, Mákos Annamária  
Nyíregyházi Egyetem Fizika Csoport

„Az életben az a legnehezebb, hogy a humor és a fizika között egyensúlyt teremts.”

*Albert Einstein*

### Bevezetés

A fizika tanítása sokszor nehézségekbe ütközik a nem szándékosan megragadt tévképzetek miatt, melyek a diákok előzetes ismereteiből és a még éretlen logikai következtetéseikből táplálkoznak. Az alacsony óraszám, a matekos környezet és a „divatos fizikautálat” miatt a diákok érdeklődését sokszor nehéz fenntartani a fizikával kapcsolatban. A digitális bennszülöttek világában fontos, hogy az oktatási módszerek is megújuljanak, és az új technológiákat is felhasználják a tanárok a diákok érdeklődésének felkeltésére. A szemléletes példák és az interaktív oktatási módszerek segíthetnek eloszlatni a tévképzeteket és érdekessé tenni a fizika tananyagot a tanulók számára.

Írásunkban azt a célt tűztük ki, hogy körbejárjuk a humor és tanulás kapcsolatát, és megvizsgáljuk, hogy a humor hogyan lehet hatékony eszköz a tanításban. A humor általában a nevetés, a mosoly és az élmények pozitív érzéseivel jár együtt. A felfokozott (pozitív) érzelmi állapot mindenképpen hatással van a szellemi tevékenység fokozására, javíthatja a memorizálást, és csökkenti a stresszt is [1].

Ha visszaemlékszünk kedvenc tanárainkra, mindig eszünkbe jut valamiféle humoros aranyköpésük is – ami



*Beszeda Imre* matematika-fizika-számítás-technika szakos középiskolai tanár, anyagtudományi mérnökfizikus, a NyE Műszaki és Agrártudományi Intézet fizikatanára. 2006 óta foglalkozik tudomány- (elsősorban fizika-) népszerűsítéssel és tehetséggondozással. A Kreatív Fizika Tábor megálmodója és szervezője.



*Stonawski Tamás* a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai adjunktus. Doktori címet 2016-ban az ELTE Fizika Tanítása doktori program keretében szerezte. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére az általános és középiskolában.

szintén arra utal, hogy egy jó tanár órájáról sohasem hiányozhat az agytekervényeket megmozgató igényes humor.

Például egy szakállas vicc a fizikával: fizikaórán Pistikét kiszólija a tanár a táblához, hogy oldjon meg egy fizikafeladatot.

- Szóval akkor Pistike, mennyi lesz a feladat végeredménye?
- Hát, az eredmény 3 lesz!
- Háromnak három, de nem lesz, hanem volt!

Ez a vicc is jól tükrözi a humor és a tanítás kapcsolatát. Warmer – magyarul, tanári nyelven: bemelegítő, ráhangoló játék feladvány vagy vicc. Apróság, de ez talán bármely tanóra vagy foglalkozás egyik legfontosabb pillanata. [12 ráhangoló játék – Diákcsoda Blog (diakcsoda.net)]

A fizikatanításba az *ad hoc* jellegű viccek helyett célirányosan vezettük be a humort, majd egy hét elteltével megkérdeztük a tanulókat, mi a véleményük az új módszerrel kapcsolatban. Válaszaikból leszűrve általában hatékonyabbnak tartották ezt a módszert a tanulásban, mert már órán megjegyezték a jó poénokat, hogy el tudják mondani másoknak is, ezáltal pedig gyakorolták a viccbe lévő tudást is. (Illusztrációként néhány válasz a diákoktól: „Mindent, ami hülyeség, megjegyezzünk.”, „Van tőle kedved tanulni.”, „Nemcsak tanulunk, hanem kicsit hülyéskedünk is.”, „Jobban benne marad a fejedben.”, „Jobb kedvvel jobb tanulni.”, „Nem jó, mert a lényeg elveszhet.”)

Tapasztalataink szerint a kamaszok automatikusan dacolnak azzal, ami kötelező – mint például bemenni az órára, vagy aktívan részt venni az óra menetében. A válaszaikból is kiderül azonban, hogy a nevetésre és a hu-



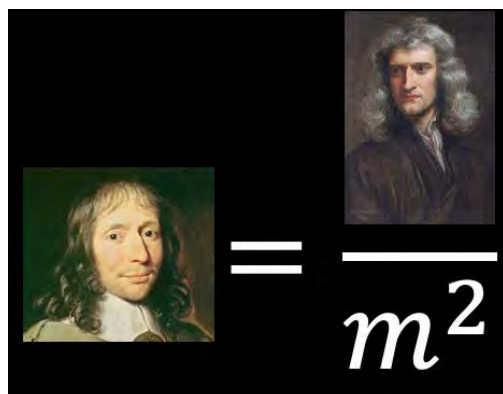
*Mákos Annamária* matematika-számítás-technika szakos tanár, a Nyíregyházi Egyetem végzős fizikatanár-hallgatója. Fontos feladatának tartja, hogy az ismereteket könnyen emészthető formában adja át diákjainak, így egyebek közt aktívan részt vesz tananyagfejlesztésben is.

morra nyitottak, hiszen általában mindenki szeret nevetni. Tudományos vizsgálatok igazolják a nevetés jótékony hatásait a szervezetre [2]. Többek között javítja a légzést és a szervezet oxigénellátását, csökkenti a stressz érzetét, az endorfin hormon termelésére serkent, amely örömezzetethez vezet. „Nevetéskor az agy több területe egyszerre működik: az összetett gondolkodásért, a mozgásért és az érzelmekért felelős területek” [3]. Ezek a folyamatok mind segíthetnek abban, hogy már a tanóra közben rögzüljenek az ismeretek, és otthon is szívesen foglalkozzanak egyes témákkal a gyerekek.

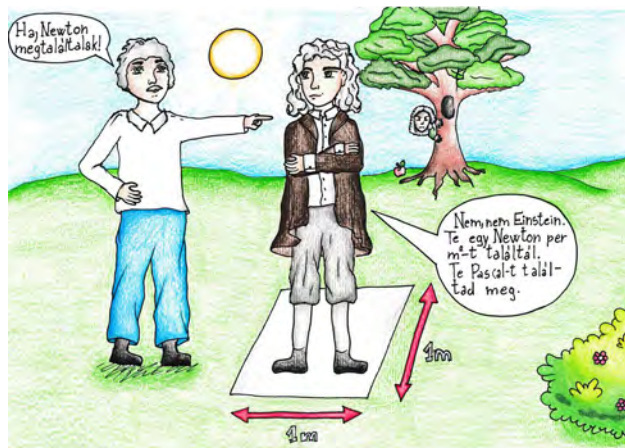
A humornak kifejezetten népszerű hordozója a mém, amely nagyban alkalmas a fiatalok figyelmének és motivációjának fenntartásához. Az emberi agy a vizuális ingereket hatékonyabban dolgozza fel és tárolja [4], mint az auditív vagy írott szöveget, így az általában vizuális mémek az élményalapú oktatás eszköztárában meghatározó szerepet tölthetnek be, és erősíthetik a tantárgyközi kapcsolatokat is. A következő részben saját gyakorlatunkból mutatunk be példákat, hogy hogyan lehet a mémeket és vicceket beépíteni az ismeretek átadásába, rögzítésébe és a figyelemfelkeltésbe az oktatási, nevelési munka során.

A vizuális segítség rendkívül hatékony lehet a tanulók számára, különösen az összetett fogalmak elsajátításakor. Például a 7. osztályban a mértékegységek és a fizikai mennyiségek jeleinek megtanulása és helyes használata gyakran kihívást jelenthet a tanulóknak. Az auditív vagy írott szöveghez képest a vizuális megjelenítés jobban segíthet a megértésben és memorizálásban. A vizuális megjelenítésnek több formája is létezik, ilyenek például a grafikonok, diagramok, ábrák és táblázatok, melyek segíthetnek az összetettebb fogalmak, mint például a mértékegységek, jelzések és szimbólumok órai feldolgozásában. Egy jól megtervezett és bemutatott vizuális anyag (pl. prezentáció) lehetővé teszi a hallott vagy olvasott szövegek jobb megértését és könnyebb memorizálását (1. ábra).

Az aktuális témához kötődő humoros vizuális anyagok gyűjtése és készítése diákbevonással hatékony motiváló tényező lehet a fizika oktatásában. Egy Messenger-csoport létrehozása, amelyben a diákok gyűjthetik és oszthatják meg a vicces anyagokat, segít a beszélgetések



1. ábra. A nyomás mértékegységének vizuális „feldolgozása”



2. ábra. Einstein és Newton bújócskáznak. Sziládi Viktória 7. osztályos diák rajza

beindításában és az érdektelen vagy hibás tartalmak kiszűrésében. A „tudományos mémek” Facebook-csoportba történő feliratkozás is jó lehetőség a humoros anyagok készletének további bővítésére (2. ábra). Az ötletek alapján a diákok készíthetnek új mémeket online mémgenerátor oldalakon, és kibontakoztathatják kreativitásukat, hogy szórakoztató módon mutathassák be a fizikai fogalmakat társaiknak.

Tapasztalataink szerint nagyon hasznos ötlet a mémek bevezetése az oktatási folyamatba, mert ha a tanulók szokásaira építünk, könnyebben teremthetünk alkotó kapcsolatot velük, és nyitottabbá tehetjük őket bármilyen témára. Így elérhetjük, hogy hatékonyabban tanuljanak és végezzenek el olyan feladatokat is, amelyeket korábban kelletlenül vagy egyáltalán nem tettek meg. Közben belső igényük is fejlődik, mert miközben saját mémeket készítenek vagy alkotnak újra, figyelnek a stílusra, a szövegalkotásra, és hogy esztétikus munkát adjanak ki a kezeik közül. Ezzel megvalósítják, hogy egy-egy téma komplexen legyen feldolgozva. A humor nagyon összetett, gondolkodásra készítő, de a folyamat végén a nevetés következménye az endorfintermelés, ami hosszasan tartó pozitív megerősítés arra, hogy érdemes volt elgondolkozni a mögöttes tartalomra. A nevetés pozitív hatással van a testre és az elmére is, ezzel kiegyensúlyozottá, új ismeretek befogadására hajlandóvá és gondolkodóvá teszi a diákokat. Így fontosnak tartjuk, hogy a fent leírt formákban a munkánk részévé tegyünk, valamint fontosnak tartjuk, hogy mindig nyitottak legyünk a gyerekek újabb felvetéseire és újításaival kapcsolatban is.

Az új anyag feldolgozása mellett a feladatok megoldásánál, a feladatok elindításánál is használhatjuk a humort mint motiváló erőt. Ezek közül néhány példát kiragadtunk, amelyek az alábbiakban olvashatók.

A fizika iránt már „megfelelően érdeklődő” tanulóknál is érdemes továbbfejleszteni a humoros szemléletet. Például viccesnek tűnő rajzok vagy felvételek alapján a fizikát hívhatjuk segítségül annak eldöntéséhez, hogy amit a felvételeken látunk, mennyire felel meg a valóságnak és mennyire benne a fikció. Írásunkban a tehetséggondozásra

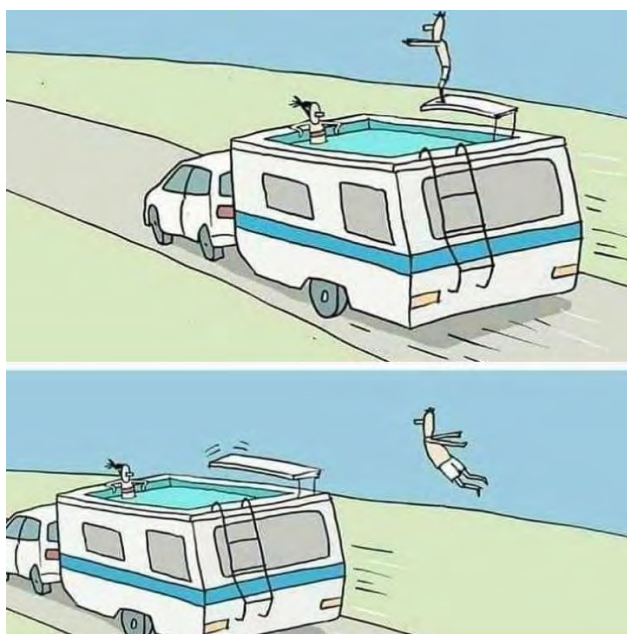


3. ábra. Az izzókat gyakran égőknek nevezik a diákok. Ezen a karikatúra segítségével tisztázható az iménti tévképzet. (Forrás: Karikatúrák: VICCES TAPSI)

is gondoltunk, így néhány analitikusan nem megoldható feladatot is bemutatunk, ahol a megoldáshoz már iterációs lépésekre is szükség van.

## Loccs vagy placcs?

Nagyon sokszor találkozhatunk bizonyos tévhitekkel a fizika törvényeivel kapcsolatosan. Egyik ilyen példa a Newton I. törvényének ismerete és alkalmazása. A 4. ábrán látható vicc sajnos nem is olyan humoros a fizika-



4. ábra. A mozgás 2 fázisát ábrázoló humoros rajz (Forrás: Facebook/ imagine science)

tanárok számára. A felugró alakot elhagyja a lakókocsi, vagyis a rajz azt sugallja, hogy mihelyt megszűnik a kapcsolat a jármű és az ugró között, annak sebessége a legtöbb ember fejében levő tévképzet szerint nullára csökken, hiszen megszűnik az őt előre mozgó erőhatás, így ő az aszfalton fog „placcsanni”.

Az 5. ábrán bemutatott kísérletből látható, hogy a trambulínról felugró ember cseppet sem marad le a von-



5. ábra. Egyenletes sebességgel haladó trambulínon ugráló férfi (Forrás: <https://www.icegif.com/17243-2/>)

tatott járműtől. Érdekes azonban megfigyelni, hogy a kocsi elején és hátulján egy-egy falat helyeztek el. A fal szerepe a vízszintes irányú erőmentesség létrehozása: ezzel a közegellenállást szinte kiküszöbölhetjük, azaz csakis a levegő ellenálló szerepe képes arra, hogy a felugró személyek járműirányú sebességét csökkentsék (az 5. ábrán a legmagasabb pozícióban kis ideig ugyan hat a közegellenállási erő, de a kis homlokfelület és a nagyon rövid időtartam miatt nem befolyásolja relevánsan a mozgást).

Visszatéve a 4. ábrára (lakókocsi) felvetődik a kérdés, hogy a közegellenállás képes-e mégis létrehozni azt, hogy a felugró a kocsi mögé essen. A probléma megér egy kis tanulmányozást.

Az elrugaszkodott személy a kocsi pillanatnyi sebességéből mit sem veszítene, ha a levegő közegellenállása nem számítana. Az ugródeszkától kapott lendülettel a függőleges mozgáskomponens egy függőleges hajtás, azaz a nehézségi erő hat rá. A vízszintes erőkomponens a közegellenállási erő, amely a felugrónak a vízszintesen haladó kocsi által elért sebességét csökkenti. Számítsuk ki, hogy a 4. ábrán látható férfi a felugrás után hova fog visszaérkezni!

Mivel a függőleges irányban lényegesen kisebb a test relatív sebessége a közeghez képest, elegendő a közegellenállással csak a vízszintes komponens esetén számolni.

Az időtartam, amikor visszaér az ugródeszkához az ugró személy (ha feltételezzük, hogy 1,6 m-re ugrott fel a férfi, a tömege 70 kg, a magassága 180 cm, a jármű sebessége 72 km/h, az ugródeszka hosszúsága 2 m az ábráról becslve):

$$t = 2\sqrt{\frac{2h}{g}} = 2\sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \text{ m}}{9,81 \text{ (m/s}^2)}} = 1,14 \text{ s.}$$

Ezalatt a jármű által megtett út:

$$s_j = v \cdot t = 20 \text{ (m/s)} \cdot 1,14 \text{ s} = 22,8 \text{ m.}$$

Az alany által vízszintesen megtett elmozdulás:  $s_e = v \cdot t + (a/2) \cdot t^2$ .

Az ugrónak a járműhöz viszonyított elmozdulása:  $\Delta s = s_j - s_e$ .

Az ugró vízszintes irányú lassulásának kezdeti értéke a közegellenállásból eredő  $F_k$  vízszintes erőkomponensből a dinamika II. törvénye szerint:

$$a = \frac{F_k}{m} = \frac{c A \rho v^2}{2m} = \frac{0,6 \cdot 0,72 \text{ m}^2 \cdot 1,29 (\text{kg/m}^3) \cdot (20 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 70 \text{ kg}} = 1,59 (\text{m/s}^2).$$

A  $c = 0,6$  becült érték, a férfi pedig átlagosan  $0,4$  m széles,  $1,8$  m magas, amiből a homloklafületére  $A = 0,72 \text{ m}^2$  adódik. A fenti képletben szereplő vízszintes sebesség viszont folyamatosan csökken a légellenállás miatt (az analitikus képlet ezért csak a kezdeti gyorsulásra alkalmazható), így a lassulás abszolút értéke is csökkenni fog. A keresett elmozdulást iterációs lépésekkel lehet pontosabban kiszámolni. A szimulációt a szabad felhasználású Scilab (<https://www.scilab.org/>) mátrixalapú szoftver segítségével írtuk, alább letölthető a forráskódja: [https://tamas.stonawski.hu/share/loccs\\_paccs.txt](https://tamas.stonawski.hu/share/loccs_paccs.txt).

Az autó és az ember vízszintes pozíciójának a különbsége visszaérkezéskor:  $x_a(i) - x(i) = 0,98 \text{ m} < 2 \text{ m}$ , tehát még a deszkára érkezik vissza!

Ha hölgy ugrott volna fel ( $m = 55 \text{ kg}$ , magasság:  $165 \text{ cm}$ ), vajon leesett volna-e?

Először is a homloklafülete más érték lesz, de a tömege is. A kettő közötti kapcsolatot a sűrűség képletével kereshetjük meg (feltételezve, hogy az emberek sűrűsége állandó):  $m/V = \rho = \text{állandó}$ . (Ez az arányosság természetesen messzemenőig idealizált.)

$$\frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot x} = \text{állandó} = \frac{70 \text{ kg}}{0,4 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}} = 972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

ahol a fenti  $0,4$  m szélességhez és  $1,8$  m-es magassághoz  $0,1$  méter „mélységűnek” becültük egy felnőt férfi testét.

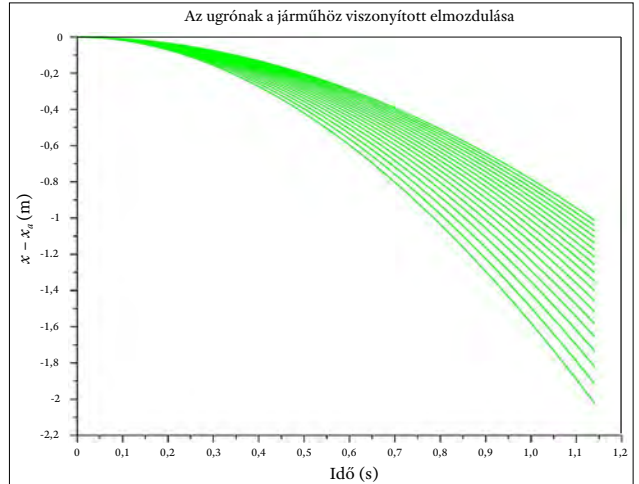
Ebből:  $A = [m/(\text{állandó} \cdot x)] \approx (1/972)(\text{m}^2/\text{kg})m$ .

Ezzel az összefüggéssel viszont a gyorsulás vízszintes komponense:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = -\frac{c A \rho v^2}{2m} = -\frac{c \frac{1}{972} \text{ kg} m \rho v^2}{2m} = -c \frac{1}{194} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \rho v^2.$$

Mint látható, a kifejezés független a tömegtől, tehát a felugró hölgy esetén is a férfínál számított értéket fogjuk kapni, azaz ő sem esik le.

Ha a férfi fogyni kezd, a homloklafület nagysága nem sokban fog különbözni, hiszen a magasság változatlan marad, és a szélesség sem változik számottevően. Így viszont megkereshetjük azt a kritikus tömeget, amikor esetleg leesik. Az előző szimulációt változtassuk meg úgy [5], hogy a belső ciklust egy olyan külső ciklusba foglal-



6. ábra. A szimulációban változatlan  $A$  homloklafület mellett csökkentettük az ugró tömegét  $70 \text{ kg}$ -ról  $32 \text{ kg}$ -ig. Látható, hogy  $70 \text{ kg}$  esetén mintegy  $1$  métert mozdul hátrafelé a járműhöz képest (legfelső görbe), míg  $32 \text{ kg}$  esetén már  $2$  métert (legalsó görbe), azaz a jármű hátuljánál le fog esni („placcsanni” fog)

juk, ahol a tömeget folyamatosan csökkentjük  $70 \text{ kg}$ -tól, és azzal a feltétellel áll meg a szimuláció, hogy az eltávolodás túllépte a  $2$  métert! A szimuláció így a  $32 \text{ kg}$ -ot számítja ki (6. ábra).

Ha analitikusan számoljuk ki, akkor az alábbi értéket kapjuk:  $m = c A \rho v^2 t^2 / (4 \Delta s) = 50,29 \text{ kg}$ , ami nagyobb a szimulációból kapott értéknél (hiszen itt  $v$  csökken a légellenállás miatt).

Ha pedig maradnak az eredeti adatok (férfi), számoljuk ki, milyen sebességgel kell a járműnek haladni ahhoz, hogy tényleg leessen az ugró a járműről, azaz placcsanjon! A szimuláció külső ciklusában most az autó sebességét növeljük fokozatosan  $72 (\text{km/h})$ -ról, amíg a leesés feltétele nem teljesül. A kapott sebességérték:  $103,44 \text{ km/h}$ . Ez a sebesség pedig autópályára engedélyezett sebesség. Vagyis megállapíthatjuk a számolások után, hogy autópályán nem érdemes így a medencébe ugrálni. (Megjegyezzük, hogy ahhoz, hogy a 4. ábrán látható helyzet jöjjön létre, azaz kb.  $2 + 3 = 5 \text{ m}$  legyen a férfi lemaradása, a szimuláció szerint  $161,3 \text{ km/h}$  sebességgel kellene haladnia a járműnek – ami elég magas, de még nem teljesen életszerűtlen sebesség.)

Még egy kérdés: ha az autó gázt ad, milyen gyorsulás esetén fog a férfi placcsanni?

$$\Delta s = s_j - s_e = v \cdot t + \frac{a_{gk}}{2} t^2 - v \cdot t - \frac{a}{2} t^2,$$

$$a_{gk} - a \approx a_{gk} = \frac{2 \Delta s}{t^2} \approx 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Azaz kb.  $8$  másodperc alatt kell, hogy „százon legyen”. Ezt a gyorsulást pedig egy középkategóriás gépkocsi is elérí. A vontatás miatt persze ezek az autók már nem lennének veszélyesek az ugróra nézve, mert az eredő gyorsulás a vontatással lényegesen csökken. Az autók fékezésakor viszont abszolútértékben jóval nagyobb gyorsulást fejtenek ki, mint gázadásnál. Ekkor az autót megelőzve placcsanna szereplőnk az aszfalra.



7. ábra. Egy medicinlabda feldobását elemeztük ki a Tracker programmal, majd szimulációval (Forrás: [6])

A problémát tovább feszegethetjük, ha emberi test helyett labdákat dobálunk fel (vagy az interneten található videókat elemezzük ki) és kiszámítjuk a labdák lemaradását az autóhoz képest.

A 7. ábrán a medicinlabda tömege: 4,54 kg, átmérője: 0,375 m, az autó sebessége: 6,71 m/s, a videóanalízis és a szimuláció eredménye: a labda 26,7 cm-rel az autó után érkezik le. (A szimuláció részleteit ld. az [5]-ben.)

## Tenisz a repülőgép szárnyán

Egy másik vicces és meghökkenítő képet találtunk, amelyet fizikai vizsgálat alá vehetünk középiskolás diákok szakköri munkája során. Az 1925-ben készült, hihetetlennek tűnő fénykép (8. ábra) valódi – a rajta szereplő személyek tényleg egy repülőgép szárnyán állnak, a levegőben teniszezés pedig egy látványos mutatvány része volt. Ugyanakkor kérdéses, valóban teniszeztek-e a szereplők, vagy csupán mímelték-e azt.



8. ábra. Tenisz 1600 méter magasan Los Angeles városa felett [7]

A 90 lóerős Curtiss JN-4 V8-as motorral felszerelt kétfedelű repülőgép 121 km/h sebességre volt képes, és akár 11 000 láb magásra is repülhetett. A repülőgép szárnyfeszítávja 14,63 m, a hossza 8,69 m volt. A repülőgép üres tömege 730 kg volt, és maximális felszálló tömege pedig 1 150 kg lehetett [8].

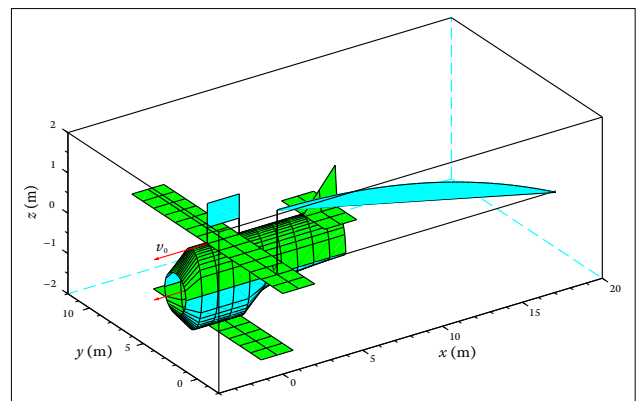
A következő kérdésekre szeretnénk választ kapni:

1. Az elejtett teniszlabda milyen pályán fog mozogni?
2. A szárny vonalába ütött teniszlabda milyen pályán fog mozogni?
3. Milyen irányban és mekkora sebességgel kell megütni a labdát, hogy az a játéktéren belül landoljon?

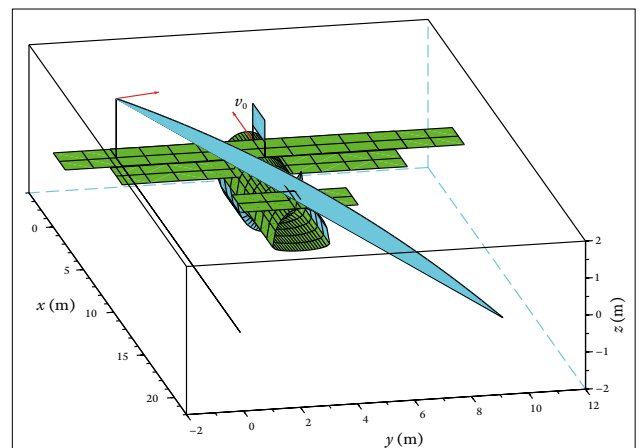
Az előző feladathoz hasonlóan itt is alkalmaznunk kell az iterációs lépéseket, hiszen a közegellenállás miatt ezt már korábban beláttuk. A feladatban, a számolások középiskolai elvégzéséhez az áramlási teret homogénnek és állandónak tekintjük (noha így fel sem tudott volna emelkedni a repülőgép). Az előző szimulációnkat ki kell azonban terjeszteni háromdimenziósra és extra elemként belevihetjük a levegő sűrűségének a magasságfüggését is. A repülő sebessége 121 km/h, a repülési magasság 1600 m. A tengelyirányokat a következőképpen választottuk meg (ld. a 9. ábrát): az  $x$  tengely a felső szárny közepétől a gép farka felé mutat vízszintes irányban, az  $y$  tengely a bal felső szárnyvégtől a jobb felső szárnyvég felé mutat, a  $z$  tengely a bal felső szárnyvégtől függőlegesen felfelé mutat, az origó a bal felső szárny végén található.

Az origóban 160 cm magasságból elejtett labda a repülőgép koordináta-rendszeréből megfigyelve a vízszintes hajításhoz hasonlóan parabolapályaszerű mozgást fog végezni, ahogy az a 9. ábrán látható. Természetesen nem fog a szárnyra esni, attól  $x = 18,45$  m-re éri el a szárny magasságát.

A szárny vonalában a játéktér felé ütött labda sem fog a szárnyon landolni. Az  $y$  irányban 15 m/s,  $z$  irányban 1 m/s sebességgel megütött labda a hagyományos



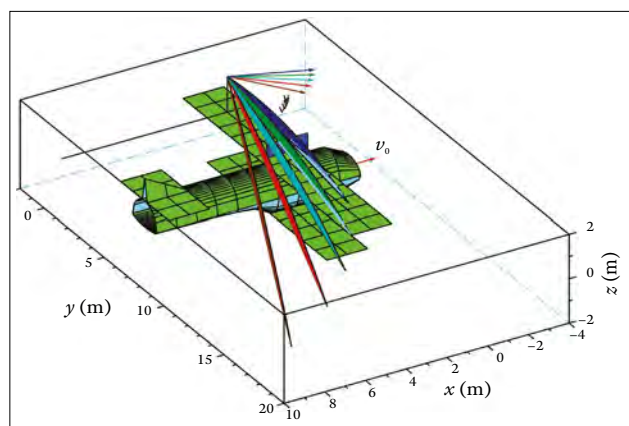
9. ábra. A szárny végén adott magasságból elejtett teniszlabda pályája a kékekkel jelölt parabolászerű pálya lesz (a szimuláció által készített rajz)



10. ábra. A szárny vonalában  $y$  irányban 15 m/s,  $z$  irányban 1 m/s sebességgel ütött teniszlabda pályája (a szimuláció által készített rajz)

mérkőzés során jó ütésnek számítana, de a repülőn elmaradna  $x = 21,47$  m-re, ahogy ezt a 10. ábra mutatja. Vegyük észre, hogy az előző értéknél nagyobb elmaradást kaptunk, ami érthető is, mert a labda most kissé felé is halad a sebesség  $z$  irányú komponense miatt.

Ezek után adódik a kérdés, hogy milyen irányban és mekkora sebességgel kell indítani a labdát, hogy az a játéktéren belül landoljon. A jó ütés kezdeti sebességértékét úgy számoltuk ki, hogy megadtuk az ütés sebességének nagyságát (35 m/s, ami átlagosnak mondható), a bevált  $v_z = 1$  m/s emelkedés mellett változóra tettük a  $v_y$ -t úgy, hogy annál a feltételnél álljon meg a szimuláció, amikor a játéktérbe pattan le a labda. A 11. ábrán eltérő színű nyilakkal jelöltünk néhány különböző indítási sebességet és a hozzájuk tartozó különböző röppályákat. A jó ütéshez tartozó megoldás:  $v_x = 33,8$  m/s,  $v_y = 15$  m/s,  $v_z = 1$  m/s lett (ld. a sötétkék színű pályát).



11. ábra. A színes nyilakkal jelölt különböző indítási sebességekhez tartozó különböző röppályák (a szimuláció által készített rajz). Ahhoz, hogy a teniszlabda a játéktéren landoljon a  $v_0$  sebességű repülőgépen, a teniszlabdát megfelelő – sötétkékkel jelölt –  $v$  sebességgel kell megütni a megfelelő irányban

Alább letölthető a szimuláció belső iterációs részének a forráskódja: <https://tamas.stonawski.hu/share/repulo.txt>

## (Rész-) eredmények

A vizsgálat gyakorlati magvalósítása 2022 szeptember óta zajlik egy 29 fős művészetis hetedik osztályban. Terveink szerint 2023 szeptemberétől párhuzamos osztályokat hasonlítunk össze a humor alkalmazásának hatékonyságának vizsgálatából.

Különösen tartottak a diákok és a szülők az újonnan belépő tantárgyaktól, így a fizikától is. A meglepő tapasztalat azonban az volt, hogy a diákok művészi hajlama és kreativitása nemcsak az egyéb művészeti órákon, hanem a fizikaórákon is segítette őket. Különösen érzékenyek voltak a humor finomságaira, és értékelték a vizuális elemeket is. Sok olyan diák van az osztályban, aki matematikából csak közepes eredményeket ért el, de fizikából nagyon jól teljesített. Bátran kérdeznak, méréseket végeznek, és megosztják gondolataikat az osztály előtt.

A tanítás során folyamatosan diszkrét visszajelzéseket kértünk a diákoktól és a szülőktől a mémek és telefonok órai használatáról. A visszajelzések sokszínűsége érdekes volt: egyes szülők aggodalmukat fejezték ki az órákkal kapcsolatosan, míg a diákok úgy érezték, hogy könnyebben értik meg az anyagot. Az órán alkalmazott humor kényes kérdés, mivel fontos megtalálni a határt az oldott és az elszabadult hangulat között. Azonban a diákok és a szülők visszajelzései segítettek jobban megérteni a mémek használatának kihívásait a tanítás hatékonyságának növelésében.

## Konklúziók

A fizikatanításban a humor alkalmazása kihívást jelent, de ha megfelelően használjuk, akkor a tanulók világnézetét bővíthetjük, és pozitív attitűdjüket erősíthetjük. Azonban a humor nem minden témában és közösségben használható, így fontos, hogy a tanárok folyamatosan figyeljenek a tanulók reakcióira és alkalmazkodjanak a generációs különbségekhez, a „digitális bennszülöttek” igényeihez is.

Lehet, hogy nem mindegyik tanítványunk fog Nobel-, vagy Ignobel-díjat kapni, de a fent tárgyalt módszer segítségével remélhetőleg néhány jellegzetes tévképzet-től meg tudjuk szabadítani őket, így szebbnek, érdekesebbnek és boldogabbnak fogják majd látni a körülöttünk lévő világot, és nem lesznek büszkéek arra, hogy semmit sem értenek a fizikából.

Végül pedig ne feledkezzünk meg arról, hogy a fizikatanítás eredményei nem a szórakoztatáson, hanem az érthetőségen és a pontos tudásanyagok alapulnak!

Köszönet *Stonawski Benjamins* az informatikai segítségért.

## Irodalom

- Zamani B., Ghaemi F., Aminzadeh R.: The place of humor in the classroom. *Journal of Education and Practice* 10(22), (2019) 20–28. [https://www.researchgate.net/publication/334662111\\_The\\_Place\\_of\\_Humor\\_in\\_the\\_Classroom](https://www.researchgate.net/publication/334662111_The_Place_of_Humor_in_the_Classroom)
- Savage B. M., Lujan H. L., Thipparthi R. R., DiCarlo S. E.: Humor, laughter, learning, and health! A brief review. *Advances in Physiology Education* 41(3), (2017) 341–347. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/advan.00030.2017>
- Szabó N.: A nevetés belső kocogás, avagy a humor és jókedv hatása a testre és a lélekre. <https://u-szeged.hu/sztemagazin/2019/nevetes-belső-kocogas?objectParentFolderId=50255>
- A mémek használata az osztályteremben tanítási módszerként: <https://www.scroogemarketer.com/post/using-memes-in-the-classroom-as-a-teaching-methodology>
- A szimulációk és a videóelemzések forrása: <https://tamas.stonawski.hu/share/humorafizikaban.zip>
- A videóelemzésnél felhasznált videó: <https://www.youtube.com/watch?v=j1URC2G2qnc&fbclid=IwAR0vAcGWdhg-7DhC8gm-HrlXMBzus6a0vOkeAU8DiOSsOzsqnAmd3tkLFVUA>
- Tenisz a repülőgép szárnyán: <https://divany.hu/vilagom/repulogep-tenisz-foto/?fbclid=IwAR1H74NmTok1oTk2BQPKqJJm-BAe0TOltb-2Qkpu2llvsF3PIjsCV2IwiyA>
- A Curtiss JN Jenny repülőgép paraméterei: [https://en.wikipedia.org/wiki/Curtiss\\_JN\\_Jenny](https://en.wikipedia.org/wiki/Curtiss_JN_Jenny)

# AZ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁS TÁVOLHATÁSA, AVAGY MIRE JÓ A POYNTING-VEKTOR; ILLETVE TUDUNK-E A FÉNYNÉL GYORSABBAN HALADÓ JELEKET ELŐÁLLÍTANI?

Fürjes Bálint<sup>1</sup>, Dóra Balázs<sup>2</sup>, Simon Ferenc<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium; furjes.balint@gmail.com

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar; dora.balazs@ttk.bme.hu

<sup>3</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar; simon.ferenc@ttk.bme.hu

<sup>4</sup>HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

## Bevezetés

Képzeliük el, hogy egy akkumulátort 300 000 km hosszú kábellel kötünk össze egy fogyasztóval, és az áramkört egy kapcsolóval szakítjuk meg, amint az 1. ábrán mutatjuk. (Itt tekintsünk most el attól, hogy egy 1 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű ilyen hosszú rézdrót ellenállása 5 MΩ.) Vajon függ a lámpa bekapcsolásának késleltetése a kapcsoló használatát követően attól, hogy a fogyasztó 1 m-re van az akkumulátortól, vagy esetleg 300 000 km-re? Függ a megfigyelt hatás attól, hogy a kábel egy sima vezetékpar, esetleg egy koaxiális kábel, vagy esetleg egy úgynevezett csavart érpáras kábel (*twisted-pair cable*)? Cikkünkben ezt a kérdést járjuk körbe és válaszoljuk meg kísérletekkel. A jelen munka a korábbi [1] jelterjedésről szóló mun-

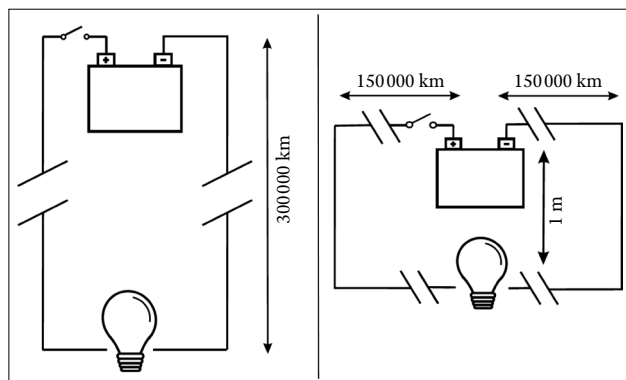
kánk folytatása, de konkrétan egy *YouTube*-videó inspirálta [2], ahol a kérdéskört tárgyalják, azonban magát az említett kísérletet nem végzik el. Mi ezt itt megtettük.

## A Poynting-vektor

A Poynting-vektor kérdésköre szorosan kapcsolódik az energia továbbításához is. Nevezetesen felmerül az a kérdés, hogy miközben energia érkezik a háztartásunkba egy erőműből, pontosan hogyan is áramlik az energia. A kérdés még furcsább lesz, amennyiben váltakozóáramot tekintünk: ilyenkor a feszültség folyamatos alternálása miatt valójában egyetlen elektron sem érkezik el hozzánk az erőműből. Példaképp számítsuk ki, hogy amennyiben egyenáramot használnánk, mennyi idő alatt érnek az elektronok a Paksi Erőműből Budapestre (vagy fordítva, hiszen a technikai áram és az elektronok iránya éppen ellentétes)!

A számításban segítségünkre van, hogy kapcsolatot találhatunk az  $I$  áramerősség és az elektronok kollektív áramlási sebessége (ez *drift*sebesség néven ismert) között. Utóbbi mennyiséget  $v_d$ -vel jelöljük:

$$I = Anev_d,$$



1. ábra. Egy akkumulátort gondolatban kétszer 300 000 km hosszúságú kábellel kötünk össze egy lámpával, és az áramkört egy kapcsolóval szakítjuk meg. Azonban a kísérletet két különböző módon végezzük el, az ábra szerint. A bal oldali ábrán a feszültségforrás és a fogyasztó messze van egymástól, míg a jobb oldali ábrán ezeket közel hozzuk egymáshoz. A két szituáció között vajon lesz különbség a bekapcsolást követően, hogy mikor kezd el világítani a lámpa?



Simon Ferenc fizikus, egyetemi tanár, a BME TTK dékánhelyettese. Érdeklődési területei: szilárdtest-spektroszkópia, a spintronika, a kvantum-információelmélet és a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: az itineráns elektronok mágnesesrezonancia-jelének felfedezése új fémekben, a spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása, spinnel nyomjelzett szén nanocsövek előállítására és triplált optikai állapotok felfedezése nanocsövekben. ERC- és Lendület-pályázatok vezetője.



Fürjes Bálint a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, természettudományos tantervű tagozaton. Fizikatanárai: Schnider Dorottya és dr. Schramek Anikó. A BME „Középiszkolás Tudományos Diákköri Konferencia” programja keretében végez a BME Természettudományi Karán kutatómunkát. Érdeklődési területe: izgalmas problémák, problémakörök a kísérleti fizikában.



Dóra Balázs fizikus, egyetemi tanár a BME TTK Elméleti Fizika Tanszékén. Érdeklődési területei: nemegyensúlyi kvantumdinamika szilárdtestekben, nemhermitikus fizika, nyílt kvantumrendszerek viselkedése, topologikus szigetelők, az alacsony dimenziós erősen korrelált rendszerek tulajdonságai. Egy Lendület-pályázat vezetője.

ahol a vezeték keresztmetszete  $A$ ,  $n$  a térfogategységben lévő elektronok száma és  $e$  az elemi töltés nagysága ( $e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$  C). A negatív előjel arra utal, hogy az elektronok negatív értékű technikai áramot visznek, ezért a számításban kapott driftsebesség is negatív lesz. A vörösréz  $\rho = 9000$  kg/m<sup>3</sup> sűrűségével és 63,54 g/mol moláris tömegével számolva egy köbméter vörösréz megközelítőleg  $1,41 \cdot 10^5$  mol, azaz  $8,5 \cdot 10^{28}$  atomot tartalmaz. Mivel a vörösrézben atomonként 1 vezetési elektron van, az elektronok sűrűsége:  $n = 8,5 \cdot 10^{28}$  1/m<sup>3</sup>. 1 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű rézdróra és 1 A áramerősségre azt kapjuk, hogy  $v_d = -0,07$  mm/s, azaz óránként az elektronok mindössze 26 cm-t tesznek meg, naponta pedig 6 métert! Eszerint a 127 km-es Paks–Budapest-távolságot ebben a példában az elektronok mintegy 50 év alatt tennék meg! Az energia nyilván nem ekkora sebességgel áramlik.

Az elektromágnességgel kapcsolatos tanulmányaink során megtanult Poynting-vektor egy segédmennyiségnek tűnik, kevés gyakorlati haszonnal. Megtanuljuk, hogy definíciója:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H},$$

ahol  $\mathbf{E}$  az elektromos és  $\mathbf{H}$  a mágneses térerősség vektora.  $\mathbf{S}$  dimenziója W/m<sup>2</sup>, azaz kifejezi az időegység alatt egységnyi felületen áthaladó energia nagyságát. Azt is megtanuljuk a középiskolában, hogy pl. a tér  $+x$  irányába haladó transzverzális elektromágneses sugárzás esetén  $\mathbf{E}$  és  $\mathbf{H}$  pont úgy vált mindig együtt előjelet, hogy amikor például  $\mathbf{E}$  a  $+y$  irányba mutat, akkor  $\mathbf{H}$  a  $+z$ -vel párhuzamos, és együtt fordulnak át majd a  $-y$ , illetve a  $-z$  irányba – így biztosítva, hogy  $\mathbf{S}$  mindig a  $+x$  irányba mutasson. A *Fizikai Szemle* korábban már foglalkozott a Poynting-vektorral [3], hivatkozva Simonyi Károly és Zombory László klasszikus egyetemi tankönyvére [4], amely mélyebben tárgyalja e fogalmat.

A továbbiakban az egyes vezeték típusok által létrehozott Poynting-vektort vizsgáljuk meg; ami egyben lehetőséget ad arra, hogy a bevezetőben felvetett kísérletet elvégezzük, és a felmerülő kérdésre egyértelmű választ adjunk.

## Kísérleti eredmények és diszkusziójuk

A bevezetőben felvetett gondolkísérlet eredményének eldöntésére egy kísérletet végzünk el. Első gondolatként az adódik, hogy mérjük az időt 1 szekundumnál sokkal pontosabban, ezáltal nincs szükség 300 000 km-es drótokra, amelyek beszerzése lássuk be, nem praktikus. Ha pl. 30 m-es drótokat használunk, akkor ezen egy jelgenerátor által keltett rövid impulzus 100 ns alatt halad át, amit egy oktatási célú oszcilloszkóppal már meg tudunk mérni. Azonban hamar rájöhettünk, hogy azt a bizonyos felkapcsolási időt nincs mihez viszonyítanunk. Ugyanabba a problémába szaladunk bele, amit a speciális relativitáselmélet tárgyalásakor szoktunk tárgyalni: mikor is tekinthető két, egymástól távol lévő esemény egyidejűnek? Honnan tudjuk, hogy mikorra is kellene odaérkeznie az impulzusnak? Mihez képest ér oda korábban vagy

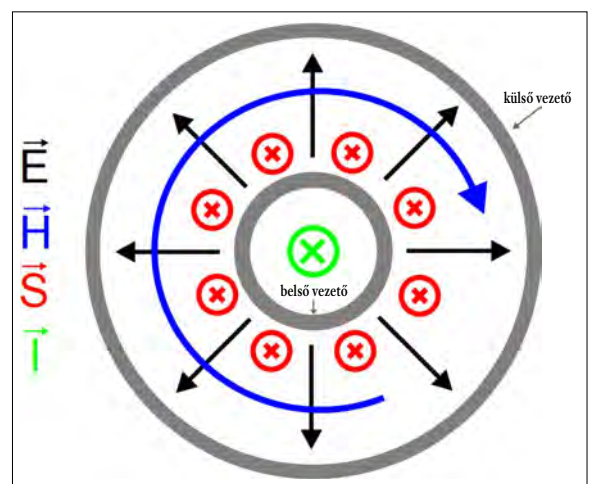
később? Ha komolyan elgondoljuk a kísérletet, a kapcsoló felkapcsolásával egyidőben valahogy jeleznünk kellene – pl. egy lézer impulzusával – annak, aki a stopperével figyel, hogy a beérkező lézerimpulzushoz képest mikor is kapcsolódik fel a vizsgált lámpa.

Érdekes mellékszálként megemlítjük, hogy az a kutatócsoport is hasonló dilemmával nézett szembe, amelyik a CERN-ben keletkező neutrínók repülési idejét szerette volna megmérni kb. 800 km távolságban. Ők referenciajelként a globális helymeghatározási rendszer (GPS) biztosította abszolút időhöz képest próbálták mérni, azonban egy optikai szál rossz csatlakozása és egy frekvenciaforrás pontatlansága miatt azt a zavarba ejtő eredményt kapták – amiről később bebizonyosodott, hogy hibás –, hogy a neutrínók a fénynél gyorsabban repültek [5].

Elvben az impulzus indítását jelző referenciajelet adhatná egy gyors lézer és gyors fotodetektor, azonban ez meglehetősen eszközigenyes, illetve egy elektronikai impulzust először fényvé kellene alakítanunk, majd vissza. Emellett biztosítani kellene, hogy a fényimpulzus mindig bejárja az előre definiált hosszúságú utat. Nekünk ezért az az ötletünk támadt, hogy készítünk egy referencia-kábelt (referenciacsatornának nevezzük ezt a továbbiakban), amelyen egy elektronikus impulzus áthaladási ideje független attól, hogy a jelgenerátor és az oszcilloszkóp milyen messze helyezkedik el egymástól. Erre azt találtuk, hogy egy koaxiális kábel a legalkalmasabb (ennek optikai megfelelője egy optikai szál lehetne, de ebben ugyanúgy konvertálnunk kellene az optikai jelet elektronikaivá és vissza).

A koaxiális kábelt pontosan azért javasolta Oliver Heaviside 1880-ban, mert ebben belül helyezkedik el mind a mágneses, mind az elektromos erővonalasereg, ezért az elektromágneses jel, azaz a Poynting-vektor is biztosan benne halad. Ezt a 2. ábrán mutatjuk.

A koaxiális kábel tulajdonságait részletesen bemutatunk korábbi cikkünkben [1], most csak azt a tulajdonsá-

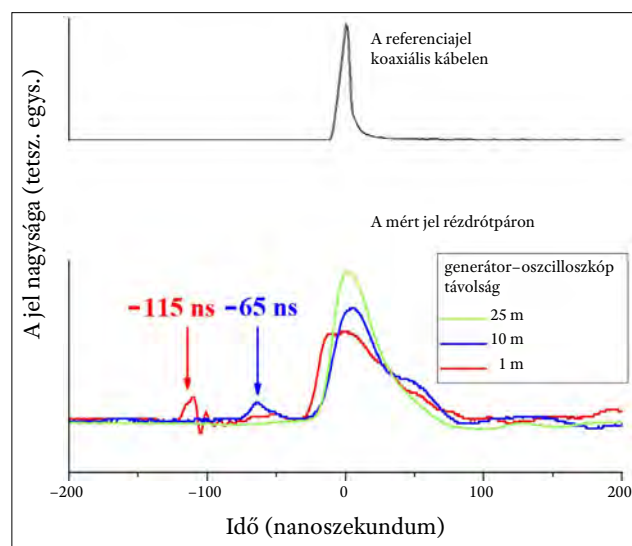


2. ábra. A koaxiális kábelben kialakuló elektromos és mágneses erővonalak, illetve a Poynting-vektor. Vegyük észre, hogy az energia a belső és külső vezető közötti dielektrikumában halad

got emelnék ki – amire később szükségünk lesz –, hogy a leggyakrabban használt, úgynevezett BNC csatlakozós, RG58 típusú kábelben a terjedési sebesség a fénysebesség kb.  $2/3$ -a, azaz  $v = 2 \cdot 10^8$  m/s (egészen pontosan  $65\%$ -a).

A kísérlethez egy Rigol DG5252-es típusú függvénygenerátort használtunk. Ennek előnye, hogy igen rövid, 10 ns hosszúságú impulzusokat tud előállítani két független csatornán. Ha csak egyetlen csatornát használnánk, akkor a kábelvégi reflexiók miatt kevésbé egyértelműen lehetne a kapott eredményeket értelmezni. A rövid impulzusokat előállító jelgenerátor mindkét kimenetét összeköttöttük egy Tektronix MDO3024 típusú oszcilloszkóppal. Az egyik csatornán egy 25 m hosszú koaxiális kábel volt, a másikon pedig egy 25 m-es közös réz drótpár, melynek két vezetékdarabját egyszerűen a földre helyeztük.

A 10 ns hosszúságú impulzusokat 1 ms-onként ismételtgettünk. Ez megfelelő várakozási idő ahhoz, hogy a két impulzus ne csússzon egymásra, és hogy az oszcilloszkóp stabilan tudjon mérni. A kísérlet során a két eszköz távolságát változtattuk, miközben össze voltak kötve az említett vezetékekkel. A 3. ábra mutatja a különböző távolságértékek esetén kapott eredményeket. A mérések során a jelgenerátor és az oszcilloszkóp először 25 m-re volt egymástól, majd 10 m-re végül pedig 1 m-re.



3. ábra. Az ismertetett összeállítás mellett kapott jelek. A referenciajelet függőleges irányban eltoltuk, hogy a rézvezetéken kapott jelet jobban be tudjuk mutatni. A rézdróton mért jeleknél vegyük észre, hogy a jelgenerátort és az oszcilloszkópot egymáshoz közelítve megjelenik a nyílal jelzett korábbi jel

Az ábrán mutatjuk a referenciajelet is függőlegesen eltolva és egy kettes faktossal összenomva, hogy a mért jeleket jobban lássuk. A referenciajeleket úgy állítottuk be, hogy ezek csúcsa a 0-hoz essen, és ehhez képest mérjük a jeleinket. Egyetlen, aránylag erős jelet figyelhetünk meg akkor, amikor a jelgenerátor és az oszcilloszkóp távolsága 25 m (zöld vonal), bár a referenciához képest ki

van szélesedve.<sup>1</sup> Ezen a jelen két változást figyelhetünk meg, amikor a két műszert egymáshoz közelítjük: a kapott csúcs nagysága csökken, és megjelenik a fő csúcs előtt egy másik (nyílal jelzett) csúcs is, időben korábban. Az előbbi jelenség is már utal arra, hogy a jel egy része nem a fő csúcsban van, azonban az utóbbi jelenség, a kisebb csúcs jelenléte már egyértelműen azt jelzi, hogy a koaxiális kábelben áthaladó jelet megelőzve is megjelenik egy jel a sima rézkábel használata esetén. Ez egyértelmű bizonyíték arra, hogy a sima rézkábeleket használva a jel „átugrik” a drót egyik darabjáról a másikra, ha elegendően közel vannak egymáshoz – azaz a Poynting-vektor terjedhet a szabad térben.

Megvizsgálhatjuk, hogy a kisebb jel mennyivel előzi meg a referenciajelet és a csupasz rézdróton kapott, nagyobb csúcsot. Erre 115 ns-ot kapunk, amikor a két műszer 1 m-re van egymástól. Tekintve, hogy a referenciaként használt koaxiális vezetéken a jel  $v = 2 \cdot 10^8$  m/s sebességgel halad, ez 23 m-t ad a várt 24 m-es értékhez képest. Ez a két érték megfelelő egyezésben van – tekintve, hogy a nagyobb csúcs is kb. 30 ns-ra kiszélesedik az eredeti 10 ns-hoz képest. Ezért megállapíthatjuk, hogy a kísérletünkben a csupasz rézdrót használata mellett a jel *instant* módon megjelenik az oszcilloszkópon, amit a Poynting-vektor segítségével tudunk magyarázni. Ez egyben meg is válaszolja a cikkünk bevezetőjében feltett kérdést: az 1. ábra jobb oldalán látható helyzetben a jel azonnal megjelenne a fogyasztón a kapcsoló felkapcsolását követően, 1 s-mal korábban, mint az 1. ábra bal oldalán bemutatott helyzetben. Megjegyezzük, hogy elvégeztünk egy kontrollkísérletet, amikor is különböző hosszúságú csupasz rézdrótot és azonos hosszúságú koaxiális kábelt használtunk, a forrást és az oszcilloszkópot messzire eltávolítva egymástól. Ebből azt kaptuk, hogy a csupasz rézdróton terjedő jel közel azonos sebességgel halad, mint a koaxiális kábelben.

A koaxiális kábel – és ennek optikai analógiája az optikai szál – fontos szerepet tölt be a hírközlésben, mégis az otthoni jelátvitásban gyakrabban találkozunk az csavart érpáras kábelekkel. Ebből is az ún. árnyékolatlan csavart érpár a legelterjedtebb (*unshielded twisted pair*, vagy UTP), ami az otthoni vezetékeshálózati megoldásokban használt. Ezt a kábeltípust a koaxiális kábel feltalálása után 1 évvel, 1881-ben szabadalmaztatta Graham Bell. Kiderül, hogy a koaxiális kábelekhez képest hasonlóan jó tulajdonságokkal bír ez a megoldás a nagyfrekvenciás jelek továbbítására, azonban mechanikailag sokkal rugalmasabb, és kisebb helyen nagyobb adatmennyiség továbbítását teszi lehetővé.

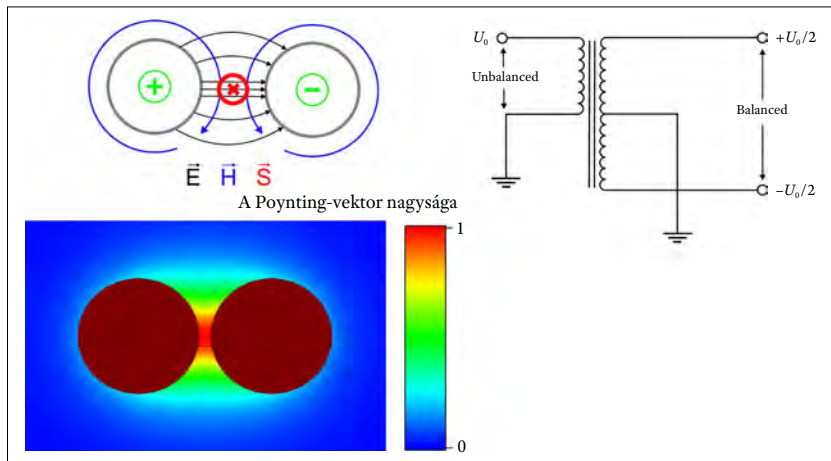
<sup>1</sup> Ennek oka valószínűleg az, hogy az egyszerű kábelben ún. diszperzió lép fel, azaz a különböző frekvenciájú jelek terjedési sebessége nem azonos, ennek részletesebb tárgyalása azonban túlmutat a jelen vizsgálaton. Érdekesképpen említjük meg, hogy sokan a diszperzió jelenségével magyarázzák a távoli villámcsapásokat követő mennydörgés időbeni hosszabb lefutását. Utóbbi jelenségnek sokkal összetettebb okai vannak, pl. a mennydörgés nem egy helyről érkezik a felhőből, illetve a különböző helyről érkező hanghullámok különböző hőmérsékletű levegőn haladnak át, ami a hangsebességet jelentősen befolyásolja.

Azonban ahhoz, hogy az árnyékolatlan csavart érpáras (UTP) megoldás működjön, szintén a Poynting-vektor megértésén alapuló trükkre van szükség. A 4. ábrán mutatjuk a csavart érpáras UTP kábelek esetén kialakuló erővonalképet, amennyiben egy úgynevezett kiegyenlítési eljárást alkalmazunk. Az ehhez használt kiegyenlített–kiegyenlítetlen átalakítót (*balanced–unbalanced converter*, vagy *balun*) is mutatja az ábra. A magyar nyelvű szakirodalom ezt az eszközt „csavartérpár-átalakítónak”, de igen gyakran csak *balunnak* hívja – mi is az utóbbi kifejezést használjuk a továbbiakban. A balun használata úgy válik érthetővé, ha felidézünk, hogy a koaxiális kábelben a külső vezeték mindig földön van, míg a belső vezetéken van csak az időben váltakozó jel. Ez ún. kiegyenlítetlen jelátvitelt eredményez. A *balun* használatával viszont az érpár két vezetékén egymással ellentétes polarítású, azonos nagyságú jeleket vihetünk át. A tényleges jel a két vezetéken lévő jelek különbségeként áll elő.

A 4. ábra szerint ekkor az így meghajtott vezetékpártól távol a mind a mágneses, mind az elektromos tér elhanyagolható: az elektromos tér eltűnését az ellentétes polarításokból, míg a mágneses tér eltűnését a két vezetékdarab körüli éppen ellentétes körüljárású mágneses térből kapjuk. Ezáltal a Poynting-vektor csak a két vezeték közötti kicsiny térrészben terjed, ezért nem is szór ki jelentősen, így nincs szükség a vezetékek árnyékolására, ami a fent említett technikai előnyöket adja. A 4. ábra kontúrdiagramon mutatja a Poynting-vektor nagyságát. Az ábrán kvalitatívan látszik, hogy  $\mathbf{S}$  a két vezetékdarab között összpontosul. Az kevésbé látszik, de a számításból kijön, hogy a vezetékpáron kívül az egyedüli vezeték esetén várt  $1/r^2$ -es függésnél ( $r$  a vezetékektől vett távolság) gyorsabban tűnik el a Poynting-vektor. Amennyiben a két  $R$  sugarú vezetékdarab a koordináta-rendszerünk  $x$  tengelyén helyezkedik el, a  $+x_0$  és  $-x_0$  helyeken ( $R$  kisebb, mint  $x_0$ ), az ábrán mutatott polarításokkal, akkor az  $\mathbf{E}$ , illetve  $\mathbf{H}$  értékek vektorkomponenseire felírva a drótokon kívüli térre ez adódik (konstansokat és töltésmennyiséget, valamint áramnagyságokat nem tartalmazza a képlet, továbbá egyik vektornak sincs  $z$  komponense):

$$\mathbf{E} = [E_x, E_y]$$

$$\sim \left[ \frac{x+x_0}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2+y^2}, \frac{y}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{y}{(x-x_0)^2+y^2} \right]$$



4. ábra. Balra fent: (csavart) érpár körül kialakuló erővonalképek és Poynting-vektor. Balra lent: a Poynting-vektor nagysága a vezetékpár körül. Jobbra fent: egy csavartérpár-átalakító vagy „balun” sematikus rajza. A balun egy transzformátormagon alapul, ami a bal oldali kiegyenlítetlen jeltől a jobb oldalon egy kiegyenlített, a két vezetékben egymással ellentétes polarítású jelet hoz létre

$$\mathbf{H} = [H_x, H_y]$$

$$\sim \left[ \frac{-y}{(x+x_0)^2+y^2} + \frac{y}{(x-x_0)^2+y^2}, \frac{x+x_0}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2+y^2} \right]$$

A Poynting-vektornak ezzel szemben csak az  $(x, y)$  síkra merőleges  $z$  komponense lesz, amely a vektorszorzás szabályai szerint az  $S_z = E_x H_y - E_y H_x$  alakban áll elő. Az így számított mennyiséget mutatja a 4. ábra.

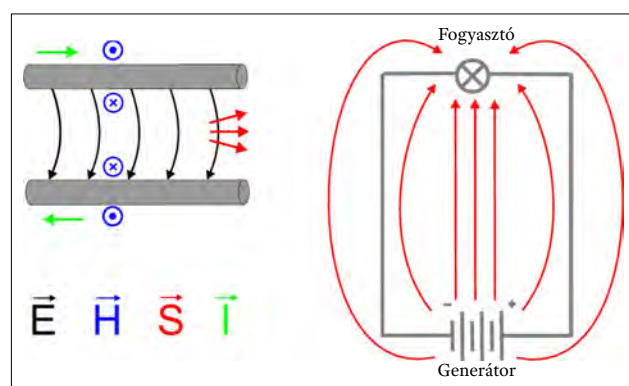
További érdekességként megemlítjük, hogy a Poynting-vektorokra nem alkalmazhatjuk a vektoros szuperpozíció törvényét: könnyen belátható, hogy a drótpár két darabja külön-külön ad két egymással párhuzamos Poynting-vektort a vezetékektől távol is. Ennek oka, hogy bár a vezetéken kívül a két vezetékdarabból ellentétes irányú elektromos és mágneses tér származik, mégis az  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  és  $(-\mathbf{E}) \times (-\mathbf{H})$  művelet eredményei párhuzamos vektorok. Azonban, amennyiben a szuperpozíciót az elektromágneses teret jellemző  $\mathbf{E}$  és  $\mathbf{H}$  vektorokra alkalmazzuk, azok lényegében kiejtik egymást a *vezetékeken kívül*, így ott az eredő Poynting-vektorra is kis eredményt kapunk. Amikor a drótpár két darabját egymáshoz közelítjük, kívül eltűnik a Poynting-vektor, azonban közöttük felerősödik, az átvitt energia tehát átrendeződik, és a két drótszál között összpontosul.

Mindezen tudás birtokában elvégeztük a kísérleteinket csavart érpáras kábel használata mellett. A referenciacsatorna továbbra is egy koaxiális kábel volt, míg egy közönséges 25 méteres UTP ethernetkábel volt a csavart érpárunk. Ennek meghajtásához a jelek átalakítása végett szükség volt egy kereskedelembe is kapható kb. 2000 Ft költségű balunra (típusa: RJ45 UTP-KOAX video balun), amelyeket párban árulnak (a jeleket vissza is kell alakítani az UTP után), és videójelek távoli átvitelére használ-

ják. Azt az eredményt kaptuk, hogy bármennyire közel hozzuk is egymáshoz a jelgenerátort és az oszcilloszkópot, az UTP kábelben átvitt jel nem érkezik meg hamarabb, mint a koaxiális kábelben átterjedő. Ez megerősíti azt, amit várunk; azaz, hogy az UTP kábelből sem jut ki a Poynting-vektor. Ehhez az eredményhez egyébként az is kell, hogy a legtöbb UTP kábelben a terjedési sebesség szintén a vákuumbeli fénysebesség kb. 65%-a. Érdekesképpen megemlíjtük, hogy a méréseink szerint az UTP kábelben átvitt jel alakja nem torzul annyit, mint a csupasz rézdróton átvitt jelé. Ez is arra utal, hogy az UTP kábel kiválóan megfelel nagyfrekvenciás jelek átvitelének céljára.

## Energiaterjedés a forrástól a fogyasztóig és a Poynting-vektor

Miután ismertettük a Poynting-vektort a leggyakoribb kábeltípusokra, meg tudjuk magyarázni a fentebb feltett kérdést, hogy az 50 Hz-es váltakozó feszültségű hálózatban hogyan is halad az energia az erőműből a fogyasztó felé.



5. ábra. Az elektromos- és mágneses térerősségvektorok és a Poynting-vektor egy hagyományos vezetékkel használt áramkörben egy forrás és fogyasztó között. A két vezetékdarab között elektromos teret találunk, ami a mágneses térrel közösen egy jól definiált irányba mutató Poynting-vektort ad, attól függően, hogy hol történik a feszültségesés, azaz hol van a fogyasztó [6]. Hasonló vezetéseket használunk energiatovábbításra is az erőmű és fogyasztók között. Vegyük észre, hogy amennyiben a forráson felcseréljük a polaritást, egyszerre fordul meg az elektromos és a mágneses terek iránya, ezért a Poynting-vektor iránya nem fog változni, azaz az energia továbbra is a forrástól áramlik a fogyasztó felé.

Az 5. ábrán mutatjuk, hogy egy hagyományos vezetékkel tartalmazó áramkörben hogyan néz ki a helyzet a forrás és a fogyasztó között. Az ábrán egy egyenáramú telepet mutatunk. Ez áramot hoz létre a vezetékben. Mivel a fogyasztón feszültségesés van, az áramot vivő odamenő és visszatérő vezetékdarabok nem azonos potenciálon vannak, és emiatt közöttük elektromos térerősséget találunk (fekete nyilak). Ennek van egy enyhén az áram irányába mutató komponense, hiszen a vezetékdarabon is esik feszültség. A vezeték körül mágneses tér jön létre

re a Biot–Savart-törvénynek megfelelően (kék jelölés). E két vektormennyiség alapján az ábrán mutatott módon kialakul a Poynting-vektor (pirossal jelzett nyilak), ami egyértelműen a teleptől a fogyasztó felé mutat. A Poynting-vektor iránya változatlan marad akkor is, ha felcseréljük a telep polaritását.

Némiképp zavaró, hogy a Poynting-vektor miért mutat mindig a teleptől a fogyasztó felé: a látszólagos aszimmetriát onnan kapjuk, hogy hogyan történik a feszültségesés, és ehhez milyen áramirány tartozik. A telep polaritásának felcserélése esetén az elektromos és a mágneses tér együtt vált előjelet, ezért a Poynting-vektor iránya változatlanul a telep felől a fogyasztó irányába mutat. Ez jól szemlélteti, hogy a Poynting-vektor iránya váltakozó áramú esetben is mindig jól meghatározott módon az energia forrásától a fogyasztó felé mutat. Érdekes az a gondolat, hogy az erőművektől a fogyasztók felé haladva az egész világunkat behálózza a Poynting-vektor – természetesen a két vezeték között a legnagyobb ennek az értéke.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy cikkünkben a Poynting-vektor szerepét szemléltettük. Egy konkrét kísérlet elvégzésén keresztül bemutattuk, hogy az energia vagy jelek terjedésénél fontos, hogy milyen vezetéken keresztül is továbbítjuk a jeleket vagy az energiát. Ez jól bemutatja, hogy a Poynting-vektor nemcsak egy fontos segédmennyiség, ami az energiatovábbítás valódi helyét és irányát leírja, hanem segít megérteni az elektromosenergia-továbbítás fizikáját és látszólagos ellentmondásait a diákok számára.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői köszönetet mondanak Halbritter Andrásnak a jelgenerátor biztosításáért, továbbá a BME Czigány Tibor rektor által kezdeményezett Középkololás TDK programjának. A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K137852, K142179, TKP2021-EGA-02 és TKP2021-NVA-02 és V4-Japán programok (2019-2.1.7-ERA-NET-2021-00028) révén, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében.

## Irodalom

1. Simon F.: Nagyfrekvenciás jelek terjedésének fizikai alapjai. *Fizika Szemle* 2018/7–8. szám, 278. o. és 2018/9. szám, 314. o.
2. <https://www.youtube.com/watch?v=bHIhgXav9LY>
3. Veszely Gy.: Áramvezetőhöz kapcsolódó felületi töltés és külső villamos tér. *Fizika Szemle* 2008/9. 300. o., <http://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0809/veszely0809.html>
4. Simonyi Károly, Zombory László: *Elméleti Villamosságtan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (2000) 55. oldal, 1.30 ábra
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light\\_neutrino\\_anomaly](https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly)
6. Holics László: *Fizika 1–2.*, Műszaki Könyvkiadó 1992.

## OROSZ LÁSZLÓ EMLÉKEZETE (1947–2023)



Orosz László (1947–2023)

Orosz László egyetemi tanulmányait a BME Villamosmérnöki Karán végezte. Itt szerzett mérnök-tanári oklevelet is. Az egyetemi diploma megszerzése (1971) után hívták meg a Fizika Tanszékre. Tudományos témáit a polikristályos fémek rugalmas tulajdonságainak mikrofizikai vizsgálatában, a szekunder ionemissziós jelenségek elméleti leírásában, illetve az egyszerű fémek felületi elektronsűrűségének a tanulmányozásában találta meg. A pásztázó alagútmikroszkóp sűrűségfüggvény-elmélettel történő leírásában elért eredményeit PhD-dolgozatban foglalta össze (1990). Orosz László 2012-ben vonult nyugdíjba a BME Fizika Tanszék egyetemi docensként, azóta címzetes egyetemi docensként segítette a tanszék oktatási és tudománynépszerűsítő tevékenységét.

Orosz László kezdetektől fogva alapvető hivatásának érezte a fizika tantárgyak (bármilyen szintű) oktatását. Elsősorban (éppen egyetemi személyes élményei alapján) a villamosmérnök-hallgatókkal foglalkozott. Aktív oktatója volt a Kvantummechanika és a Szilárdtestfizika tantárgyaknak. Meggyőződése volt, hogy modern villamosmérnöki munka nem valósulhat meg a kvantummechanikai ismeretek nélkül, ezért fontosnak tekintette ennek a magas szintű oktatását. Mérnök-hallgatók generációi kerültek ki a keze alól. Hivatástudatát és a fizika iránti elkötelezett szenvedélyét a hallgatóság többször is a Villamosmérnöki és Informatikai Kar „legjobb oktatójának” járó díjjal honorálta. 1990-től oktatóként is és a Fizika Tanszék oktatási felelőseként is aktívan részt vett a BME-n induló fizikusképzésben.

Oktatói tevékenysége messze túlmutatott a tantermi kereteken: személyes felelősségének tartotta a hátrányos helyzetű vagy tanulási nehézségekkel küzdő diákok fel-

karolását és tanulmányi felzárkóztatását. Előadásaira jellemző volt a tudás szenvedélyes átadása iránti vágy; nem tolerálta a lustaságot, vagy ha azt érezte, hogy egy diák hanyagul bánik az egyenletekkel. Vizsgáira jellemző volt a szigorú következetesség; és a diákok, bár féltek a vizsgáitól, mégis szeretettel emlékeztek meg róla. Főszerkesztőként jegyezte a *BME (A)lapok kezdőknek és haladóknak* elnevezésű franciakártyát, mely a mai korra jelentős hatással bíró tudósokra, eredeti gondolkodókra hívta fel a figyelmet az MTMI (Matematikai, Természettudományi, Műszaki és Informatikai) területeken.

Szívügyének tartotta az áltudományok elleni küzdelmet. A székesfehérvári Szkeptikusok Országos Konferenciáján történt részvételt követően fogalmazódott meg Orosz Lászlóban – társaival, *Füstöss Lászlóval* és *Härtlein Károllyal* közösen, hogy kell egy budapesti konferencia is, ahová a hallgatók könnyebben eljuthatnak. 2004-ben rendezték meg először a Budapesti Szkeptikus Konferenciát. A koncepció az volt, hogy senkit nem állítanak a szervezők pellengérré, inkább az adott témákban előadókat hívnak meg, akik az előadásaikban valódi tudományos ismereteket közölnek, tanítanak. A megszerzett tudás birtokában ugyanis nagyobb valószínűséggel ismerik fel az áltudományt a hallgatók. Laci már az első konferencián a fizikusok „mumusa” könyvében leírt állításainak hibáit mutatta be. Az előadás felejthetetlen maradt, mert a könyv szerzője Lacit az első sorban hallgatta.



Orosz László a *Mikulás Fizika* rendezvényen 2015-ben, a legendás BME F29-es tanteremben ad elő a gyermekeknek



Orosz László a BME Gyerekegyetem rendezvényén a Bagoly kabalafiguraként magyaráz

Szerencsére az előadás – köszönhetően az internetnek – ma is meghallgatható (<https://kifu.videotorium.hu/hu/recordings/91/altudomanyos-mechanika>)

A másik szívügye – ami szorosan összefüggött a szkeptikus tevékenységgel – a tudomány népszerűsítése a fiatalabbak és a szélesebb társadalom körében. A tudományos ismeretterjesztő tevékenység fontosságára többször is felhívta a figyelmet a Kutatók Éjszakája rendezvénysorozat keretében is. A szeptember utolsó péntekén tartott esemény egyik legfontosabb üzenete az, hogy közel kell hozni a tudomány eredményeit a hétköznapi emberekhez,

hidat kell képezni nekik a tudomány felé, hogy megérthessék a körülöttük lévő világot és gondolkodjanak. De egyben azt is vallotta, hogy a médiának is nagy szerepe van az áltudományok előretörésében és így a médiával is partneri kapcsolatra törekedett azért, hogy ezek ellen eredményesen lehessen felvenni a harcot.

Ennek szellemében vállalt meghatározó szerepet 2015-től a BME Gyerekegyetem mozgalom létrehozásában és megvalósításában. A Gyerekegyetem előadásainak moderátora és ezáltal a gyerekegyetem védjegyét jelentő Bagoly figurájának megtestesítője volt a rendezvényeken. Ezekben a nyári táborokban az elmúlt nyolc évben több mint 3500 gyermek vett részt. Igyekezett közérthető módon felhívni a diákok figyelmét a tudomány erejére, belső logikájára, a fizika és a kísérleti munka csodáira.

„Nem tanulás, amit itt csináltok, és mégis tanulni fogtok; nem játszótér és mégis szórakozni fogtok. A célunk, hogy megmutassuk, a minket körülvevő, időnként bonyolult működésű tárgyakat – a telefontól a ruhán keresztül az űrrakétáig – mind-mind mérnökök tervezik és alkotják. Az első lépés az ilyen munka felé az érdeklődések felkeltése” – mindezt minden alkalommal töretlen sikerrel, népszerűséggel, fáradhatatlanul magyarázva és autogramot adva a jegyzetfüzetekbe.

*Härtlein Károly, Dallos Györgyi,  
Lázi Márta, Füstöss László*

## FELHÍVÁS

# JELÖLÉSI/PÁLYÁZATI FELHÍVÁS AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT KITÜNTETŐ ÉRMEIRE, VALAMINT FELSŐOKTATÁSI ÉS TUDOMÁNYOS DÍJAIRA

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatot vár a Társulat 2024. évi kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira. Kérjük a Társulat szakcsoportjait, területi csoportjait és valamennyi tagunkat, hogy a kitüntetésre érdemes kollégákat és tudományos eredményeiket bemutató javaslataikat legkésőbb **2024. március 11-ig** szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1092 Budapest, Ráday utca 18. fszt. 3., [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)). A tudományos díjakat a kutatók saját kezdeményezésükre is megpályázhatják.

A Társulati díjakra a jelölések/pályázatok benyújtására szolgáló adatlapok letölthetők az ELFT honlapjának díj szekciójából (<http://elft.hu/tarsulattrol/dijak/>),

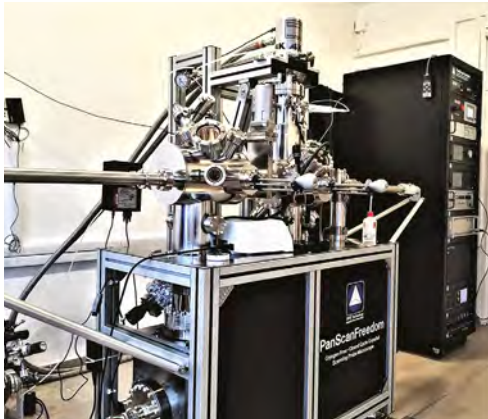
ahol egyben az elbírálási eljárás részleteire vonatkozó ismertetés is megtalálható. Kérjük, hogy a jelölések megfogalmazásában vegyék figyelembe az ismertető információit. Az ismertetés minden díjat hozzákapcsol legalább egy szakcsoport kutatási területéhez, amely szakcsoport ajánlásának beszerzése ajánlatos, de nem kötelező. A tudományos díjak elnyerésének nem előfeltétele a társulati tagság. A mellékletek nagy részének elegendő a nyilvános (speciális esetben a Díjbizottság tagjaira korlátozott) adatbázisokból történő elérhetőségének megadása.

A társulati kitüntetéseket, valamint a tudományos és felsőoktatási díjakat várhatóan az ELFT Küldöttgyűlésen, 2024. május 25-én adjuk át.

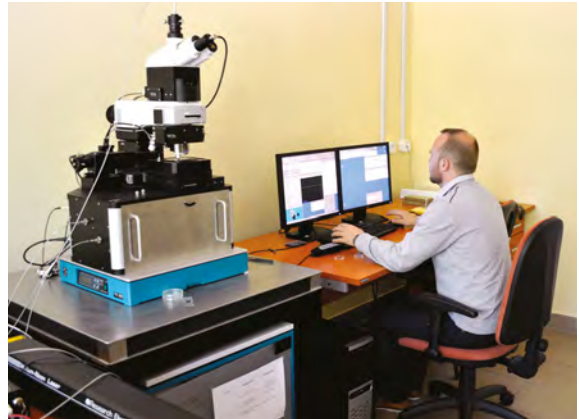
*Groma István*  
főtitkár

*Ormos Pál*  
elnök

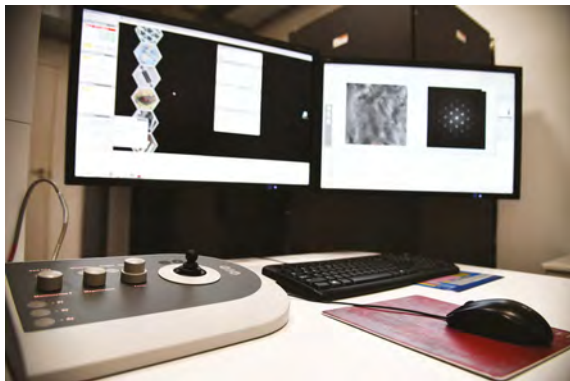
## Képek a HUN-REN EK MFA laboratóriumaiból



Az ultranagy vákuumban működő pásztázó alagútmikroszkóp



A kombinált AFM/Raman/optikai közétér-mikroszkóp.  
A mikroszkópnál dr. Tapasztó Levente



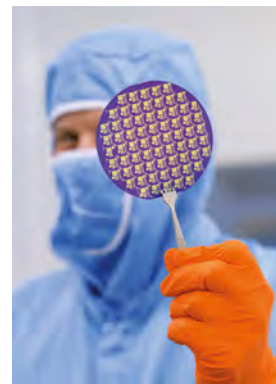
A THEMIS mikroszkóp vezérlőegysége



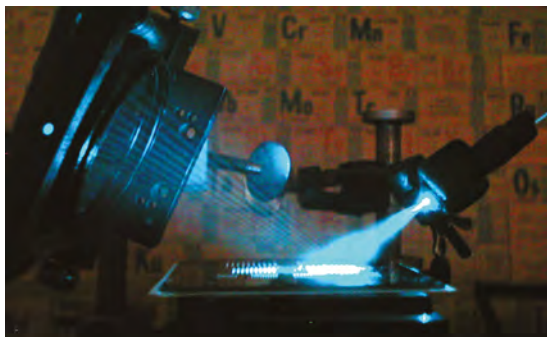
A Mikrotechnológia laboratóriumában telepített szilícium szeletek oxidálására és hőkezelésére alkalmas magas hőmérsékletű kályha



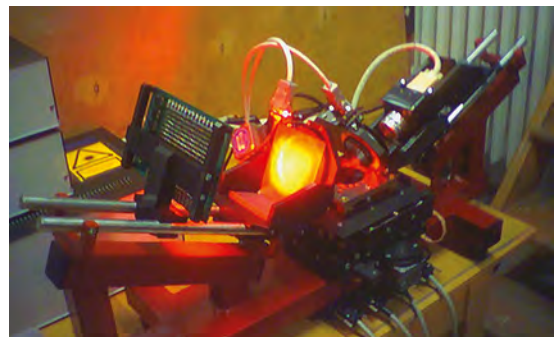
A gömbhiba-korrigált THEMIS 200 TEM/STEM mikroszkóp Angström alatti felbontással



MEMS érzékelő chippek szilíciumszeleten a Mikrotechnológiai laboratóriumban



A saját fejlesztésű divergens fényforrású térképező ellipszométer



A saját fejlesztésű kiterjedt fényforrású térképező ellipszométer

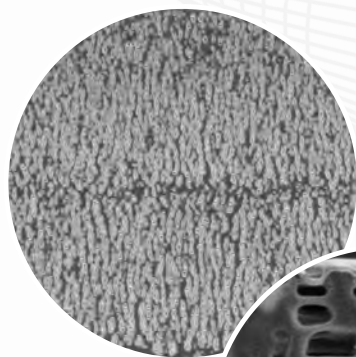
Fotó: Szakolczai Krisztina (HUN-REN EK MFA)

# SEMPrep2

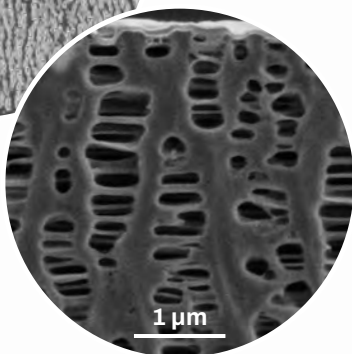
## Innovatív ionsugaras mintapreparálási megoldás



A Technoorg Linda több mint 30 éves szakmai tapasztalattal rendelkezik a nehezen megmunkálható minták elektronmikroszkópos vizsgálatában és az azt megelőző anyagtudományi feltárásban. Ehhez kis és nagy energiájú argonionnyaláb kibocsátására is alkalmas, világszínvonalat képviselő berendezéseket fejlesztenek.



2500x  
nagyítás



20 000x  
nagyítás

## Makulátlan minőségű minták - az atomi felbontás eléréséhez

Akkumulátor szeparátorfóliáról készült keresztmetzeti bemetszés pásztázó elektronmikroszkópos képe. Jól látható különbség figyelhető meg a két különböző mikrostruktúrájú poliolefin fázis határfelületén. A műtermékmentes felület minősége nagy nagyítás alatt is kiváló. A minta a Technoorg Linda SEMPrep2 berendezésével készült, a piacon egyedülálló módon, hűtés alkalmazása nélkül.

A képek az alábbi pásztázó elektronmikroszkóppal készültek:  
Thermo Scientific Scios 2 DualBeam FIB SEM

Lépjen velünk kapcsolatba személyes konzultációért vagy küldje el hozzánk a vizsgálni kívánt mintát, hogy képzett szakembereink megtalálják az Ön számára legmegfelelőbb preparálási eljárást

További információkért a mintapreparálásról és gépeinkről olvassa be a lenti QR-kódot

TECHNOORG  
L I N D A

Discover the invisible.

technoorg.hu

info@technoorg.hu

06-1- 342-8713

1044 Budapest, Ipari park u. 10.

