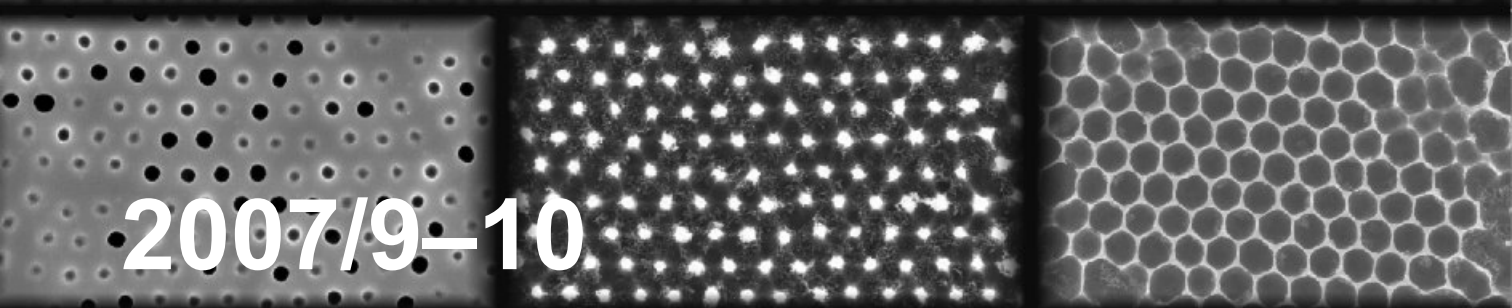
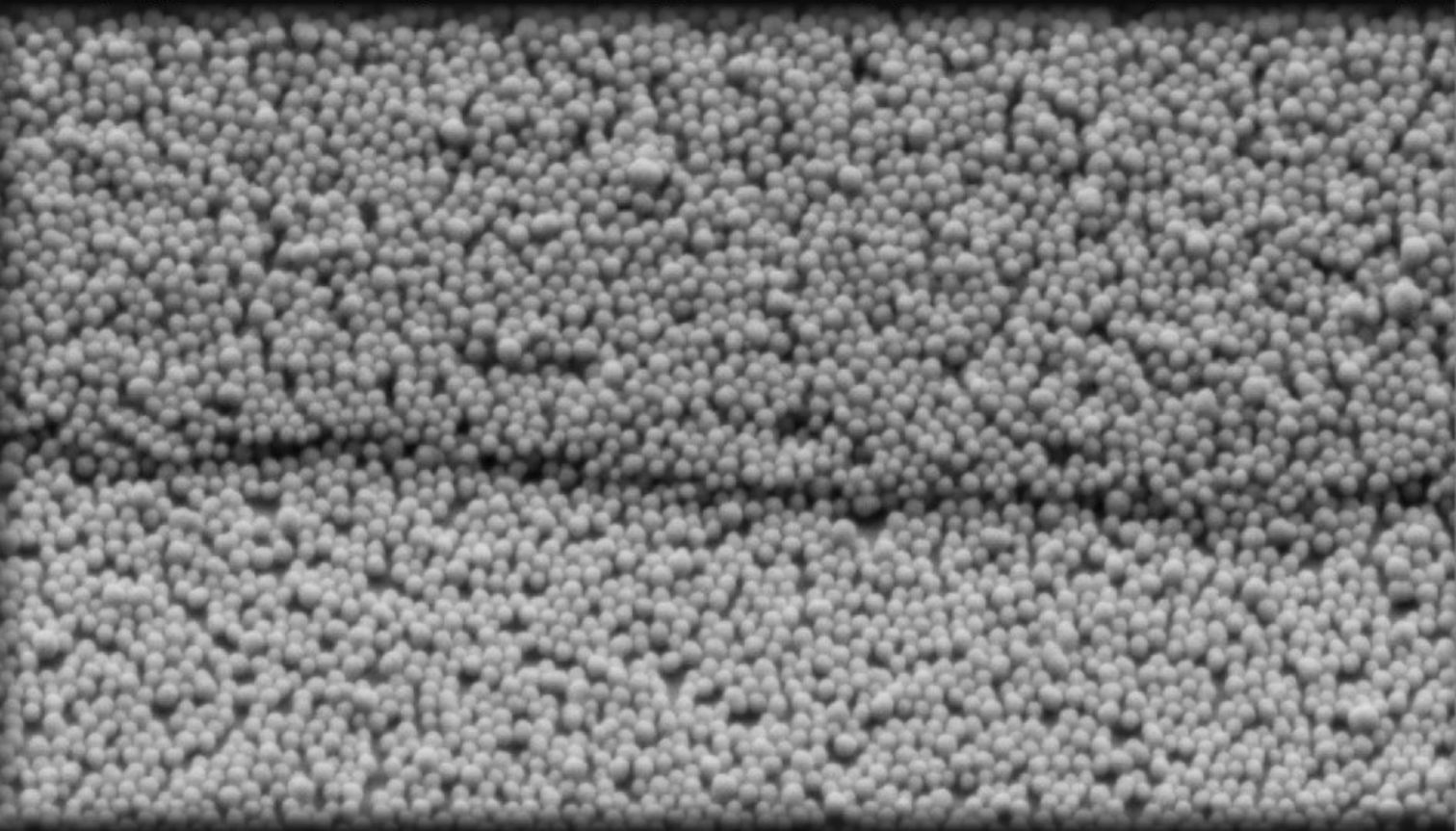
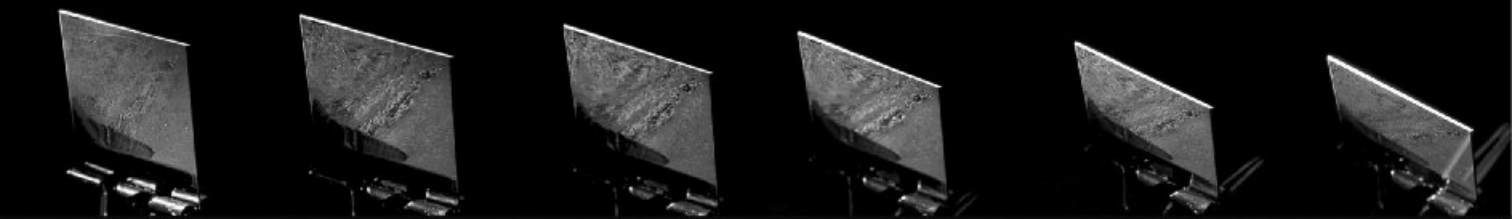
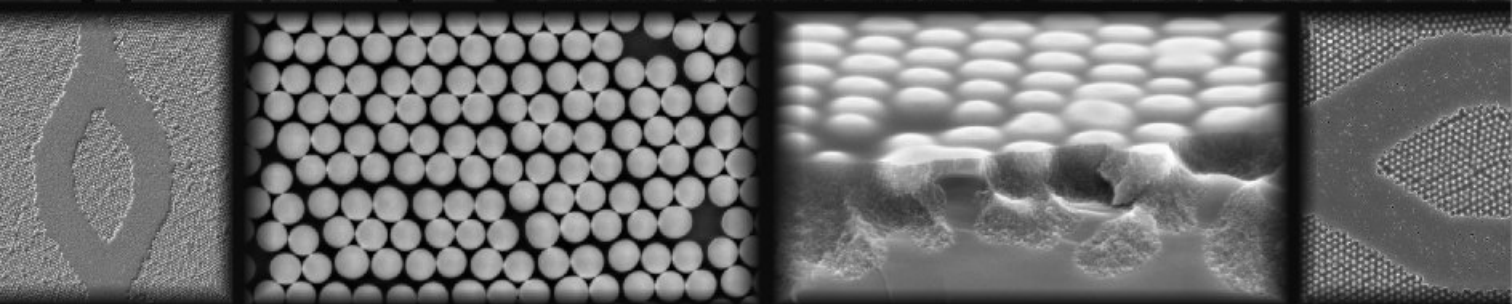


fizikai szemle



2007/9–10



**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat
havonta megjelenő folyóirata.
Támogatók: A Magyar Tudományos
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,
az Oktatási Minisztérium,
a Magyar Biofizikai Társaság,
a Magyar Nukleáris Társaság
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete**

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

**Beke Dezső, Bencze Gyula,
Czitrovsky Aladár, Faigel Gyula,
Gyulai József, Horváth Dezső,
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,
Sükösd Csaba, Szabados László,
Szabó Gábor, Tóth Kálmán,
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,
Ujvári Sándor**

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

**Elektronmikroszkópi felvételek 93 nm
átmérőjű amorf SiO₂-gömbök
Langmuir–Blodgett (LB) rétegeiről,
valamint néhány pórusos
szilíciumstruktúráról.
A periodikus pórusos szerkezetek az
LB-rétegek ionimplantációs
leképezésével jöttek létre.
(Lásd a periodikus nanostruktúrákkal
foglalkozó írást
a 314–319. oldalakon.)**

TARTALOM

<i>Almár Iván:</i> Az úrkorszak első félszázada	289
Kutatás – versenyképesen (<i>Kádár György, Bársony István</i>)	295
<i>Gyulai József:</i> Egyesült anyagtudomány	296
<i>Gergely György, Gurbán Sándor, Sulyok Attila, Menybárd Miklós:</i> Elektrontranszport-paraméterek meghatározása	299
<i>Vértesy Gábor, Pardaviné Horváth Márta:</i> Mikroméretű monodomén részecskék mágneses viselkedése	302
<i>Zolnai Zsolt, N.Q. Khánb, Battistig Gábor:</i> A csatornahatás szerepe ionsugaras analitikai és ionimplantációs kísérletekben	305
<i>Lobner Tivadar, Gergely György, Petrik Péter, Fried Miklós:</i> Az ellipszometria alkalmazása félvezető-fizikai kutatásokban	310
<i>Nagy Norbert, Pap Andrea Edit, Deák András, Horváth Enikő, Hórvölgyi Zoltán, Bársony István:</i> Periodikus nanostruktúrák makroszkopikusan nagy felületeken	314
<i>Bérczi Alajos:</i> Elektronmozgás fehéjrékben	320
<i>Szergényi István:</i> A kollektív előkészítés, az oktatás, a tudomány és a technológiafejlesztés szerepe az energiapolitikában	325
<i>Láng Róbert:</i> Tudósok fasora	331
A FIZIKA TANÍTÁSA	
Az ELTE Fizika Doktori Iskolája „A fizika tanítása” címmel (<i>Jubász András</i>)	333
Rocard-jelentés – elsőkézből (<i>Szilágyi Zsuzsa</i> interjúja <i>Csermely Péterrel</i>)	340
PÁLYÁZATOK	343
HÍREK – ESEMÉNYEK	344

I. Almár: The first half century of the cosmic era

Competitive research (*G. Kádár, I. Bársony*)

J. Gyulai: Unified material science

G. Gergely, S. Gurbán, A. Sulyok, M. Menybárd: The determination of electron transport
process parameters

G. Vértesy, M. Pardavi-Horváth: The magnetic behaviour of the monodomain microparticles
Zs. Zolnai, N.Q. Khánb, G. Battistig: The role of channel effect in analytical or
ion beam implantation ion beam experiments

T. Lobner, G. Gergely, P. Petrik, M. Fried: The application of ellipsometry
in semiconductor physics experiments

N. Nagy, A.E. Pap, A. Deák, E. Horváth, Z. Hórvölgyi, I. Bársony: Periodical
nanostructures on macroscopic surfaces

A. Bérczi: Electron displacing in proteins

I. Szergényi: Collective instruction, education, science and technological progress
as means of energy politics

R. Láng: The alley of scientists

TEACHING PHYSICS

The “Education in Physics” graduate school of ELTE (Budapest) University (*A. Jubász*)

The Rocard Report (A talk of *Zs. Szilágyi* with *P. Csermely*)

TENDERS, EVENTS

I. Almár: Das erste halbe Jahrhundert der kosmischen Ära
Konkurrenzfähige Forschung (*G. Kádár, I. Bársony*)

J. Gyulai: Vereinheitlichte Wissenschaft der Materie

G. Gergely, S. Gurbán, A. Sulyok, M. Menybárd: Die Bestimmung der Parameter
von Elektronen-Transportprozessen

G. Vértesy, M. Pardavi-Horváth: Das magnetische Verhalten mikroskopischer,
einer Domäne zugehöriger Teilchen

Zs. Zolnai, N.Q. Khánb, G. Battistig: Die Rolle des Kanaleffekts in Ionenstrahl-Experimenten
mit analytischer oder präparativer Bestimmung

T. Lobner, G. Gergely, P. Petrik, M. Fried: Die Anwendung der Ellipsometrie in
Experimenten der Halbleiterphysik

N. Nagy, A.E. Pap, A. Deák, E. Horváth, Z. Hórvölgyi, I. Bársony: Periodische
Nanostrukturen auf makroskopischen Oberflächen

A. Bérczi: Elektronenbewegungen in Proteinen

I. Szergényi: Kollektive Aufklärung und Ausbildung, Wissenschaft und Fortschritt
der Technologien als Mittel der Energiepolitik

R. Láng: Die Allee der Wissenschaftler

PHYSIKUNTERRICHT

Die Doktorenschule „Unterricht in Physik“ der Budapester ELTE-Universität (*A. Jubász*)

Der Rocard-Bericht (Ein Gespräch von *Zs. Szilágyi* mit *P. Csermely*)

AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE

В этом номере оглавление находится на 319. стр.

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVII. évfolyam

9–10. szám

2007. szeptember–október

AZ ŰRKORSZAK ELSŐ FÉLÉVSZÁZADA

Sikerek, kudarcok, tanulságok

Almár Iván

az Űrkutatási Tudományos Tanács elnöke

1957. október 4-e azon ritka dátumok egyike, amelyek világtörténelmi jelentősége azonnal nyilvánvaló volt. Az első szputnyik (*1. ábra*) születésének napjára általában úgy emlékezünk (így jellemezték az újságok kezdettől fogva), mint arra a napra, amikor az ember először juttatta fel eszközeit a világűrbe. Ez a megállapítás azonban vitatható, hiszen attól függ, hogy hol vonjuk meg a légkör és a világűr határát. Éppen napjainkban, amikor kezdik világszerte „űrturistáknak” nevezni azokat, akik rakétával 100 km fölötti magasságig jutottak, nem felesleges arra emlékeztetni, hogy az első szputnyik előtt is többször jutottak fel parabolapályán szovjet és amerikai műszerek száz, sőt ezer km-t meghaladó magasságba. Például 1956. szeptember 20-án egy amerikai Jupiter C rakéta 39 kg-nyi

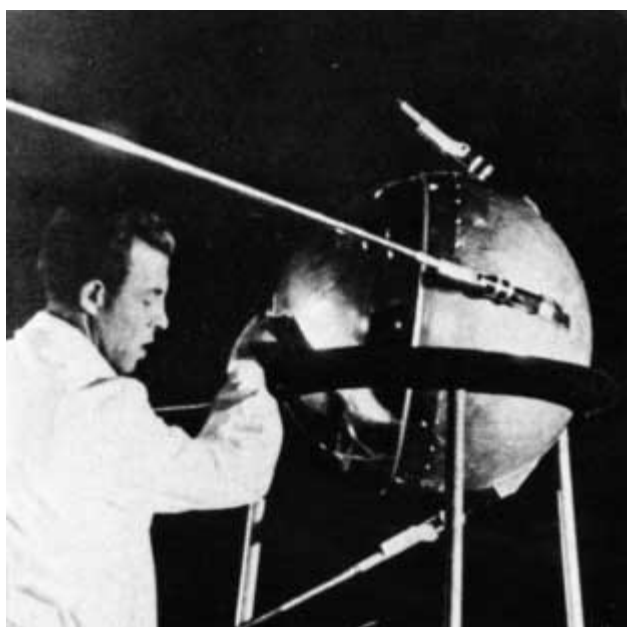
hasznos terhe 1094 km magasságig repült fel, miközben 4800 km távolságot tett meg. Aligha tagadható, hogy e műszerek rövid ideig a világűrben jártak. A hangsúly azonban a „rövid ideig” kifejezésen van. Az első szputnyik előtt ugyanis nem volt egyetlen földi berendezés sem, amely, mesterséges égitestté válva, tartósan keringett volna a Föld körül. 1957. október 4-e nem arról nevezetes, hogy az ember eszközei feljutottak bizonyos magasságig, hanem arról, hogy megszületett az első műhold. Új korszak kezdetének pedig azért nevezhető, mert azóta százával, sőt ezrével követték automata (és részben ember által lakott) űreszközök Föld körüli pályán.

Az első öt év

Tulajdonképpen nem is egyetlen, kimagasló eseményről van szó. Mint ahogy *Kolumbusz* 1492-es amerikai útja azért volt korszakalkotó, világtörténelmi esemény, mert – szemben a vikingek vagy a kínaiak állítólagos rövid kirándulásaival az amerikai kontinensen – újra meg újra ismétlődött, és elvezetett az „új világ” gyarmatosításához. Az akkori korszak technikáját is figyelembe véve a hódítás és gyarmatosítás időszaka tulajdonképpen igen rövid volt. Közhelyszerű, és szinte felesleges említeni, hogy ezt a folyamatot akkor, a 16. és 17. században anyagi érdekek hajtották (elsősorban arany szerzése volt a cél), de közben jelentősen átalakította világképünket, és véglegesen kitágította az addig csak Európára, továbbá Ázsia és Afrika bizonyos részeire korlátozódó „ismert világot”.

Valami hasonló folyamat zajlott le az elmúlt század közepén, de a technika robbanásszerű fejlődése következtében a kolumbuszi felfedező utakhoz képest szédületes sebességgel. Alig egy hónappal az első szputnyik után pályára került a második, amely első-

1. ábra. Az összeszerelt Szputnyik-1





2. ábra. Lajka kutya a fellövés előtt

sorban természetesen arról nevezetes, hogy fedélzetén már élőlény (a Lajka kutya, 2. ábra) utazott. De arra már kevesebben emlékeznek, hogy a 2. szputnyik hasznos terhe – szemben az első műhold 84 kg-jával – már elérte az 500 kg-ot.

A sorozat döbbenetes tempóban folytatódott a következő öt évben. Néhány példa:

- Az első amerikai hold (Explorer-1) felfedezi a Van Allen-övezeteket (1958. február).

- Elindul a Score 1, az első távközlési hold (1958. december 18.).

- A szovjet Luna-1 megközelíti a Holdat, és mesterséges bolygóvá válik. Sok ezerszer messzebb jut a Földtől, mint a korábbi űreszközök (1959. január 2.).

- A Luna-2 becsapódik a Holdba (1959. szeptember 14.).

- A Luna-3 megkerüli a Holdat, és lefényképezi annak a Földről soha nem látható oldalát. Ez volt az űrszillagászat első eredménye (1959. október 4.).

- Az amerikai TIROS-1 az első meteorológiai hold (1960. április 10.).

- Az amerikai Transit-1B az első navigációs műhold (1960. április 13.).

- Sikeresen visszatér a földre a Discoverer-14 amerikai műhold kapszulája (1960. augusztus 19.).

- Egy szovjet szputnyik-űrhajón kutyák térnek vissza élve a világűrből (1960. augusztus 20.).

- Az amerikai Courier-1B az első aktív távközlési hold (1960. október 4.).

- A Vénusz felé indul a szovjet Venyera-1 űrszonda (1961. február 12.).

- A szovjet Vosztok-1 űrhajó fedélzetén *Jurij Gagarin* egy keringést végez a Föld körül (1961. április 12., 3. ábra).

- A Vosztok-2 fedélzetén *German Tyitov* egy egész napig kering a Föld körül (1961. augusztus 6.).

- 1962-ben már páros kötélekrepülést is végrehajtottak, űrszondát indítottak a Mars felé, pályára állt az első angol műhold stb. Még ebben az évben, 1962 decemberében a Mariner-2 amerikai űrszonda a Vénusz környezetéből továbbította méréseit. Ezen utak bármely paraméterét tekintjük, az ugrások óriásiak: a második űrhajós az elsőhöz képest 16-szorosra növel-

te a súlytalanságban töltött időt; a Mariner-2 240-szer nagyobb távolságból továbbított méréseket, mint az addigi holdrakéták, és 200 ezerszer messzebből, mint a szokásos műholdak.

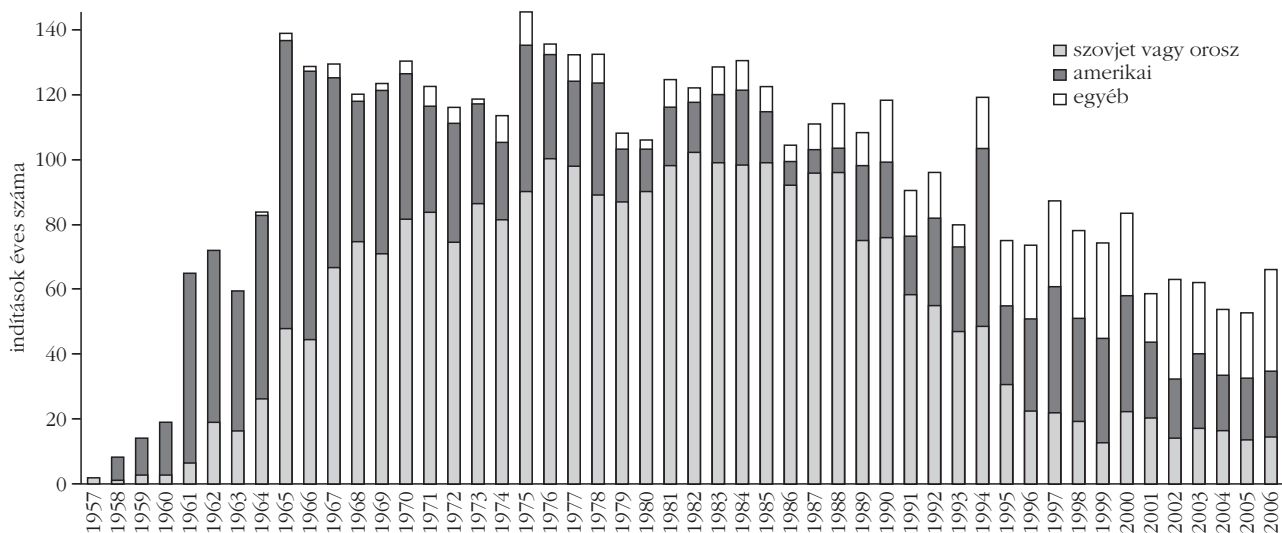
Az első öt év szédítően gyors fejlődését mi, „hivatásos szakmai kommentátorok” is alig tudtuk követni. Nehezítette dolgunkat, hogy a Szovjetunió csak utólag adott ki közleményt űrkísérleteiről, az amerikai kiadványokhoz pedig hazánkban akkoriban alig lehetett hozzájutni. De nemcsak mi voltunk zavarban, amikor a jövő kilátásairól kérdeztek, hanem a tűzhöz közelebb lévő szakértők is, akik szinte kivétel nélkül úgy vélték, hogy ez a szédítő iram folytatódni fog a következő évtizedekben is. Kiváló bizonyíték erre a *Space Age in Fiscal Year 2001* című amerikai tanulmánygyűjtemény, amely egy 1966 márciusában Washingtonban rendezett szimpózium anyagát tartalmazza. A szakértők előrejelzései a 20. század végére az űrhajózás minden képzeletet felülmúló fejlődését prognosztizálták: emberes megfigyelőbázist a Merkúron (1988), asztrobiológiai bázist a Marson (1992), űrhajósokat a Szaturnusz Titán nevű holdján (1995), fűzős energiát hasznosító atoműrhajókat, lakott űrbázisok százait stb. Azt várták, hogy a hordozórakéta-indítások éves száma 2000-re meghaladja az egymilliót, az évente pályára juttatott tömeg pedig a 100 ezer tonnát.

Sikerek és kudarcok az elmúlt 50 évben

Most, 2007-ben természetesen tudjuk, hogy egyáltalán nem ez történt. Az éves indítások átlagos száma például 1965 és 1985 között 120 volt ugyan, de ez után fokozatosan csökkenni kezdett, és 2005-re már nem haladta meg az 1961-es szintet (60 indítás évente). Ezt látva (4. ábra) joggal feltehető a kérdés, hogy az egész űrkutatás visszafejlődött-e a 20. század végére, és ha igen, akkor miért? Tényleg csak a két nagyhatalom hidegháborús vetélkedése volt a fejlődés motorja, majd, ahogy a versengés és a hidegháború fokozatosan megszűnt, úgy csökkent világszerte az érdeklődés és a rendelkezésre álló pénz is?

3. ábra. Jurij Gagarin





4. ábra. Hordozórakéták évenkénti indításszáma 2006-ig. (Forrás: P. Lala)

Mint az ennyire leegyszerűsített kérdések esetében mindig, a helyzet és a válasz ennél sokkal bonyolultabb. Először is tisztázni kell, hogy ez a szakterület – nevezzük űrtevékenységnek – időközben legalább négy szakágazatra bomlott szét, amelyek összefüggnek ugyan, de fejlődésük az elmúlt évtizedekben lényegében külön utakon futott. Mindegyikről érdemes külön-külön helyzetképet adni, mert enélkül aligha érthető az a helyzet, ami a világűrben 2007-re kialakult. A négy szakágazat a következő:

- Hordozóeszközök, kozmodrómok, infrastruktúra a világűrben;
- Űrtudomány, kutató műholdak, bolygóközi űrszondák;
- Közvetett és közvetlen hasznosítások, űralkalmazások;
- Űrhajózás, űrrepülés, felfedezőutak – ember a világűrben.

Hordozóeszközök

Vitathatatlan, hogy jelenleg – a prognózisokhoz viszonyítva – ezen a területen van a legnagyobb elmaradás. Majdnem minden változatlan például az 1980-as évekhez képest. Az orosz űrhajósok változatlanul a régi, több ízben tökéletesített, nagyon megbízható *Szovjuz* űrhajót és hordozórakétát használják, amelynek a neve még mindig a Szovjetunióra emlékeztet. A NASA 1981 óta a *Space Shuttle* űrrepülőgépekkel repül, bár a Challenger-katasztrófa óta műholdak pályára állításánál újra hagyományos hordozórakétákat (*Atlas*, *Titan*, *Delta*) használnak. De az űrrepülőgépek napjai meg vannak számlálva, noha 20–25 éve még minden szakember megesküdött volna arra, hogy a többször felhasználható űrsiklóké a jövő. Mégis, a helyzet másként alakult, mert nemcsak az oroszok és a kínaiak ragaszkodnak a hagyományos, egyszer használható űrkapszulákhoz, hanem a NASA is hamarosan visszatér ehhez a megoldáshoz (CEV = Orion). Miért? A válasz egyelőre csak annyi, hogy ez az eszköz olcsóbb és biztonságosabb, bár kényelmet-

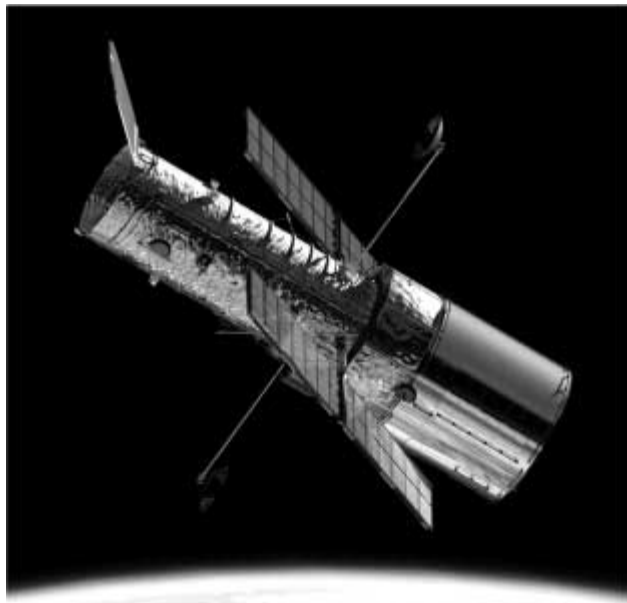
lenebb jármű a világűrbe. Aligha hiszem, hogy ezt egyetlen szakértő is megjósolta volna!

Lehet-e ezek után e területen sikerről beszélni? Tény, hogy az utóbbi évtizedekben fokozatosan nőtt a hagyományos hordozórakéták megbízhatósága. Ez nyilván összefügg az Oroszországban, az USA-ban, Ukrajnában, Japánban, Kínában és Európában egyaránt tapasztalható állami konzervativizmussal, vagyis mindenütt kerülnek a gyökeresen új megoldásokat. Igazából csak a magántőke kísérletezik néha nem hagyományos hordozóeszközökkel abban a reményben, hogy a szállítási költségeket jelentősen csökkenteni tudja. Ez évtizedek óta napirenden van ugyan, de lényeges áttörés nem történt. Lehet, hogy még mindig túl erős az államilag támogatott cégek hagyományos hordozórakétáinak konkurenciája – különös tekintettel az orosz arzenálból leszerelt kis hordozórakéták (pl. Dnyepri) megjelenésére a magánholdak piacán. Az újszerű hordozóeszközök esetében magasabbak a biztosítási költségek és nagyobb a kockázat is, ezért nem igazán versenyképesek.

Űrtudomány, űrkutatás

Ez a terület kétségkívül sikerágazat. Az űreszközök eljutottak a bolygókra vagy azok köré, kisbolygókra és üstökösök közelébe. Bár, sajnos, a tudományos célú holdak és a Naprendszer kutató űrszondák megépítése és felbocsátása változatlanul drága, de ma egy-egy műszer-csomag fajlagosan sokkal több, sokkal érzékenyebb és jelentősen megbízhatóbb műszert tartalmaz, mint néhány évtizede. Sőt, az sem újdonság már, hogy az évek óta eredményesen működő tudományos hold mellett megjelennek a szerelő űrhajósok, akik lecserélik a meghibásodott, vagy egyszerűen elavult egységeket. A *Hubble-űrtávcső* (5. ábra) többszöri javítása erre kiváló példa. De az is egyre megszokottabbá válik, hogy utólag modernebbre és tökéletesebbre cserélik egy már messze a bolygóközi térben járó űrszonda fedélzeti szoftverjét.

Sok más paraméter szerint is kimutatható a fejlődés ezen a területen. A miniatürizált, parányi kamerákkal



5. ábra. A Hubble-űrtávcső

például részletekben gazdag képeket lehet készíteni bármilyen megközelített égitest felszínéről. De jelentősen megnőtt a műszerek és berendezések megbízhatósága és élettartama is. Szabványosították a műszereket tartó és kiszolgáló talpazatokat, „buszokat” is. Ezáltal olcsóbbá váltak a kutatások, és egyre több ország engedheti meg magának, hogy önállóan, méginkább nemzetközi együttműködésben, részt vegyen a Föld környezetének, a Holdnak és a Naprendszer más égtesteinek felderítésében (pl. Japán, India, ESA, Franciaország, de kisebb mértékben Magyarország is). Noha az űrtudományra, űrkutatásra fordított összeg összességében – elsősorban a NASA és az ESA költségvetését véve figyelembe – évtizedek óta stagnál, a felsorolt tényezők hatására az űrkutatás mégis virágzik, mert ugyanakkora összegből több program finanszírozható.

Végül érdemes megemlíteni néhány pozitív és negatív fejleményt e területen. Negatív, hogy az oroszok hosszú ideje passzívak a Naprendszer kutatásának területén, noha az 1980-as évekig a Szovjetunió fontos szerepet játszott a bolygók és üstökösök vizsgálatában. Ugyancsak sajnálatos tény, hogy az óriásbolygók felé még mindig csak a NASA indít űrszondákat (*Galileo*, *Cassini*, *New Horizons*). Különösen feltűnő, hogy évtizedek óta napirenden van ugyan egy a Mars felszínéről mintát hozó szonda terve, az mégsem halad a megvalósítás felé.

Pozitív fejlemény viszont a „kozmosz biliárd” vagy „hintamanőver” egyre elterjedtebb alkalmazása, és minden várakozást felülmúló sikere. Az ok nyilván a pályaszámítási technika döbbenetes fejlődésében keresendő. E megoldással nemcsak olcsóbbá válik a bolygószon-dák indítása, hanem lehetővé teszi „másodlagos célpontok” (kisbolygók, üstökösök) vizsgálatát is.

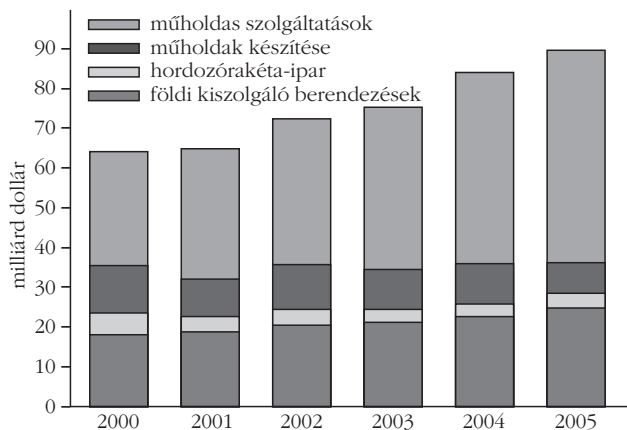
Kedvező fejlemény az is, hogy ezen a szakterületen harmonikus együttműködés alakult ki az űrügynökségek között. A közös fejlesztésű űrszonda vagy tudományos hold immár nem kivétel, hanem szabály (és

elsősorban az ESA-ra jellemző). Több űrtudományi területen – elsősorban a napfizikában, de a magnetoszféra-ionoszféra-felsőléggör kutatásában is – szoros kapcsolat alakult ki a gyakorlati alkalmazásokkal, hiszen a Nap földi hatásai a mindennapi életet is befolyásolják. Rengeteg értékes tudományos eredmény született e holdak és szondák segítségével: többek között megismertük a Naprendszer égtesteit, valamint feltárult a csillagvilág a teljes elektromágneses spektrumban. Ma már túlzás nélkül kijelenthető, hogy nincs is modern csillagászat a légkörön túlról végzett megfigyelések nélkül. Olyan fontos, új tudományterületek születtek az űreszközök hatékony közreműködésével, mint a röntgenszállagászat, az űr-VLBI a rádiócsillagászatban (nagy bázisvonalú rádió-interferometria), az űr-asztrometria, vagy a gammakitörések felfedezése és vizsgálata. Végül érdekességgént megemlíthető, hogy ma már rengeteg üstökös felfedezése (amely tevékenység régebben az amatőr csillagászok hagyományos vadászterületének számított) a napfizikai holdaknak a Nap közvetlen közelét mutató felvételei alapján történik.

Gyakorlati alkalmazások

Nem kétséges, hogy ezen a területen születtek a legváratlanabb és életünkre legnagyobb hatású eredmények. Természetesen léteznek bizonyos szakterületek, ahol kezdettől fogva nyilvánvaló volt, hogy a 3. dimenzió megjelenése, vagyis a nagy magasságok hasznosítása forradalmasíthatja a szolgáltatást. Ilyen volt a *meteorológia*, mivel a műholdak kezdettől fogva egész kontinensek felhőzetének felülről történő, „real time” áttekintését tették lehetővé. Ez nyilvánvalóan nagymértékben segítette az időjárás előrejelzését. Ilyen volt a távközlés is, ahol a magasan repülő műholdakkal a hangvagy képátvitel akár az óceánokon keresztül is lehetségessé vált. Később a meteorológia kiegészült a Föld felszínének különböző színektartományokban történő fényképezésével, illetve a radaros megfigyelésekkel a világűrben (*űrtávérzékelés*).

Gyors és viszonylag zökkenőmentes volt a fejlődés az *űrtávközlés* területén, ahol a közvetítő műholdak gyorsan benépesítették a kitüntetett helyzetű geostacionárius pályát. Kellő sugárzási teljesítmény esetén ugyanis a geostacionárius holdak vétele a Föld felszínéről (a sarkvidékek kivételével) könnyen és olcsón megoldható, mert a vevőantennát csak az égbolt egy fix pontjára kell irányítani. (A geostacionárius hold ugyanis keringés közben mindig az Egyenlítő azonos pontja fölött, 36 ezer km magasságban marad.) Az egyre növekvő igények kielégítésére az igénybe vett frekvenciasávok egyre magasabbra csúsztak, és a közvetítő holdak keskeny nyalábokkal célozták meg a felhasználókat. A technikai részletek helyett inkább az a lényeges körülmény, hogy a polgári célú űrtávközlés hamar üzleti vállalkozássá vált, nem igényelt többé állami támogatást, és szinte teljesen elszakadt attól az állami űrpolitikától, amelyet a nagy űrügynökségek világszerte képviselnek.



6. ábra. Az űrtevékenységből származó bevételek megoszlása és növekedése 2000. és 2005. között (forrás: J. Logsdon, SIA).

Az űrtávérzékelés területén is hasonló folyamat kezdődött, de nem fejeződött be. A probléma abban rejlik, hogy az űrfelvételek egy jelentős része olyan közkinccs, amely áruba nem bocsátható. Ilyenek elsősorban a meteorológiai felvételek, de például természeti katasztrófák idején sem illik pénzt kérni a helyzet felméréséért. E problémának ugyanakkor van egy másik oldala is: bizonyos, nagy felbontású űrfelvételek olyan stratégiai (esetleg katonai) jellegű információkat tartalmazhatnak, amelyek terjesztése egyes országok biztonságát veszélyeztetheti. Vagyis az űrtávérzékelési piacnak az űrtávközlésihez hasonló, teljes privatizációja nem valósult, mert nem valósulhatott meg. A szakágazatot mind a mai napig kettősség és bizonytalanság jellemzi: például nincs rögzítve, hogy a meteorológiai célú, ingyen hozzáférhető felvételek milyen vizsgálatokhoz használhatók és milyenekhez nem.

Tulajdonképpen tökéletes meglepetésként jött létre az elmúlt évtizedben az alkalmazások harmadik nagy piaca, a *navigáció és helymeghatározás* műholdak segítségével. Az eredetileg kifejezetten katonai célra létrehozott, amerikai GPS-rendszer olyan hasznosnak bizonyult, hogy, mindenféle korlátot áttörve, széles körben elterjedt az egész világon (bizonyos mértékig kiegészítve az orosz GLONASSZ-rendszerrel). Éppen a katonai jelleg miatt ez megmaradt ugyan ingyenes szolgáltatásnak, de a hozzá tartozó GPS-vevőberendezések, szoftverek már üzleti alapon kerültek forgalomba. Ez óriási piaccá vált, különösen amióta nemcsak hajók, repülőgépek és műholdak, hanem személyautók és turisták is GPS-szel navigálnak az országutakon, sőt a városokban is.

Ezek a felhasználók szinte már nem is tudják, hogy nemcsak a telefonhívásuk és a televíziójukon látható műsor, hanem az autójuk navigálása is műholdakon keresztül terjed. Ma már elképzelhetetlen a katasztrófaelhárítás, a környezetvédelem, a térképészet, a várostervezés, az ásványi kincsek feltárása, a vízgazdálkodás, az óceanográfia, de még a nagyüzemi mezőgazdasági termelés is űrtechnika nélkül. Az alkalmazások száma gyorsan növekszik, és egyben gyorsan nő azon (főleg fejlődő) országok száma is, amelyek az űrtechnikát veszik igénybe napi gondjaik megoldásá-

hoz. A rendelkezésre álló, néhány deciméter felbontású űrfelvételek mindenütt sikerrel alkalmazhatók, ahol a helyzetet gyorsan és megbízhatóan – esetleg nehezen megközelíthető területen – kell felmérni. Ha viszont felhők akadályozzák az optikai űrtávérzékelést, akkor be lehet vetni az egyre elterjedtebb radarholdakat. Nagy jövő előtt áll az utóbbi két alkalmazás, vagyis a távérzékelés és a navigáció összekapcsolása egyetlen rendszerre: a felhasználó a kézben tartható műszerrel nemcsak felülről látja környezetét, hanem pontos helyzetét is ismeri a terepen.

De az űralkalmazások területe sem csak sikertörténet. Emlékeztet például, hogy 1999 körül a nagyszámú, alacsony pályán keringő közvetítő holdra alapozott közvetlen telefonrendszerek (*Iridium*, *Globalstar*) csődbe mentek, mert a piac nem igényelte ezt a viszonylag drága szolgáltatást. Az egész űrparajd nem belerokkant ebbe a tévedésbe. Sajnos könnyen lehet, hogy a közeljövőben Európa is hasonlóan nehéz helyzetbe kerül, ha az európai navigációs holdak rendszere, az évek óta drágán kifejlesztett *Galiileo*-program elakad.

Vannak olyan lehetséges alkalmazási területek is, ahol – a korábbi várakozások ellenére – még kísérleti programok sem indultak. Ilyen például az olcsó és tiszta energia termelése a világűrben, és lesugárzása földi hasznosításra. De abból sem lett semmi, amit a Szovjetunióban terveztek, hogy hatalmas tükröműholdakkal biztosítják a távoli északon fekvő városaik közvilágítását. Ennél realisabb célkitűzés volt, hogy az űrállomások fedélzetén végzett anyagtudományi kísérletek eredményeképpen kedvező tulajdonságú új anyagok szülessenek, és ezért érdemes magántőkével gyártókapacitást telepíteni a világűrbe. Mindez az elmúlt évtizedekben nem valósult meg, sőt talán még azt is kimondhatjuk, hogy közelebb sem került a megvalósuláshoz. Mindezek ellenére az űralkalmazások területe gazdaságilag sikeresen fejlődött az elmúlt években is, mint ezt a 6. ábra bizonyítja.

Emberek a világűrben

Ez az egész űrtevékenység legvitatottabb és legellentmondásosabb területe. Mindenekelőtt azért, mert a nagyhatalmak állami űrköltségvetésük túlnyomó részét erre fordítják, ugyanakkor az eredményesség megkérdőjelezhető. Mivel külön tanulmányt igényelne annak vizsgálata, hogy mennyire hasznos vagy haszontalan az ember jelenléte a világűrben (egyrészt gazdasági, másrészt politikai, illetve stratégiai szempontból), ezért most csak arra szorítkozunk, hogy áttekintsük a sikereket és a kudarokat ezen a területen is.

Sikernek tekinthető, hogy emberek jelenléte a világűrben folyamatossá vált az elmúlt fél évszázadban. Először a *Mir*; majd a *Nemzetközi Űrállomás* lakói bizonyították, hogy egyrészt a különböző nemzetiségű és kultúrájú űrhajósok képesek békésen és harmonikusan együtt dolgozni, másrészt azt, hogy a világűrben való tartózkodás (a súlytalanság, a magasabb sugárzási szint stb.) akár egy éven keresztül is elvisel-

hető, nincsenek visszafordíthatatlan, káros hatásai. Az a félezer űrhajós, aki eddig kipróbálta a súlytalanságot, vitathatatlanul sikeresen és eredményesen végezte munkáját – mind az űrállomások belsejében, mind a szabad világűrben, mind a Hold felszínén. Nem rajtuk múlt, hogy ezen a területen immár évtizedek óta stagnál a fejlődés, hiszen ma is csak 2–3 űrhajós dolgozik egyetlen űrállomáson, akárcsak húsz-harminc évvel ezelőtt. Ez a tény önmagában is ellentmond minden tervnek és előrejelzésnek.

Egyébként az, hogy jelenleg egyetlen építményben, az épülő Nemzetközi Űrállomáson koncentrálódik minden infrastruktúra, amely embereknek a világűrben való tartózkodásához szükséges, önmagában is világosan jelzi a program sérülékenységet és veszélyeit. Valószínű, hogy ha a Nemzetközi Űrállomással komolyabb baleset történne, akkor évtizedekre megszakadna az egész emberes űrprogram, mivel sem tartalék létesítmény, sem pénz nem lenne a kiesett kapacitás pótlására. Ugyanakkor jelenleg minden hivatalos, távlati űrprogram (*Space Exploration*, illetve *Global Exploration Strategy*) űrbeli felfedezőutakat, holdbázisok építését, sőt Mars-utazást tervez a következő két évtizedben. Lesz ebből egyáltalán valami? A kérdés jogos, mert az *exploration program* még egyáltalán nem jutott túl azon a kritikus ponton, ahonnan kezdve befejezni már könnyebb, mint leállítani. Mindenesetre növeli az esélyeit, hogy idén május 31-én a világ 14 legnagyobb űrügynöksége együttműködési megállapodást (*Global Exploration Strategy*) írt alá, amely lényegében a NASA „space exploration” programjának közös megvalósítására vállalkozik. Bár a megállapodás részleteket nem tartalmaz, jelentősége mégis óriási a 21. század űrhajózási kilátásai szempontjából. (Megemlítjük, hogy a magyar sajtó erről a megállapodásról nem tartotta érdemesnek beszámolni.)

A space exploration „víziója”, amelyet *Bush* elnök még 2004 januárjában jelentett be, az elmúlt két évben formát öltött, és terv jellegűvé vált. Már ismeretes, hogy milyen új űrhajókat és hordozórakétákat rendel a NASA a Hold-utazás megvalósítására, mintegy 2020-ig elkészült a menetrend tervezete is, és most, ezzel a megállapodással a program „nemzetköziesítése” is megkezdődött. Mindez nem jelenti azt, hogy az egész feltétlenül úgy fog megvalósulni, ahogy napjainkban a NASA tervezi. A Nemzetközi Űrállomás építésének eddigi hányatott története tanulságos példa arra, hogy mire lehet számítani: gazdasági és politikai problémák, balesetek hátráltathatják az előrehaladást, ennek eredményeként pedig csökkenhet, illetve időben eltolódhat az egész program. A *Challenger*, illetve a *Columbia* tragédiái annak idején nemcsak évekre leállították, de alapvető veszélybe is sodorták az emberes űrprogramot annak ellenére, hogy ilyen jellegű baleseteket eleve kizárni, lehetőségét tagadni naivítás lenne.

Véleményem szerint e fontos terület, vagyis az emberes űrprogramok küszködése az elmúlt évtizedekben alapvetően arra a tényre vezethető vissza, hogy a legutóbbi időkig szinte csak két nagyhatalom (USA, Oroszország) állami űrköltségvetése volt az egész



7. ábra. Charles Simonyi/Simonyi Károly, az űrturisták egyike

vállalkozás alapja. Kína belépése szerény mértékben ugyan, de kétségtelenül változtatott a helyzeten. Ugyanakkor nyilvánvaló, hogy a korábban tárgyalt másik három területen – hordozórakéták, űrtudomány, űralkalmazások – sokkal szélesebbek a felhasználható források: mindenekelőtt a magántőke, de a kisebb országok széles skálájának szerényebb, de összességében jelentős űrköltségvetése is.

Milyen megoldás lehetséges annak érdekében, hogy az emberes programok sérülékenysége megszűnjön, és a fejlődés folytatódjon? (Tekintsünk most el azon kisebbség véleményétől, amely legszívesebben teljesen leállítaná az emberek repüléseit a világűrben!) Tökéletes megoldás – mint ez a másik három területen is bebizonyosodott – nem létezik, de az ottani tanulságok hasznosíthatók lehetnének. Ilyen például a több forrásból származó költségvetés szükségessége, a magántőke bevonása, a piac igényeinek fokozott kielégítése stb.

Az emberes űrprogram esetében a kínálkozó lehetőség az *űrturizmus* (7. ábra) elterjedése lehet. Még nem említettük, de az utóbbi néhány év fontos fejleménye, hogy néhány gazdag civil – horribilis összegért – látogatást tehetett a Nemzetközi Űrállomáson. Az, hogy ezekre a számunkra felfoghatatlanul drága utakra bőven akadt jelentkező, és öt személy különösebb probléma nélkül végre is hajtotta már az űrutazást, ígéretes fejlemény. Ugyanakkor elsősorban az USA-ban, de újabban másutt is folyik űrturisták toborzása új fejlesztésű hordozóeszközökkel (lényegében kis űrrepülőgépekkel) történő „űrgrásokra”, legalább 100 km magasságig (8. ábra). A jegyek ára nem olcsó, de töredéke az igazi űrturizmusra vállalkozókénak. Új-Mexikóban számukra speciális, kereskedelmi űrrepülőtér is létesül. Mindez igazából csak áttételesen kapcsolódik az „emberes űrprogramok” témaköréhez, mivel – mint említettük már – jelenleg csak az tekinthető űrhajósnak, aki járművével legalább egyszer megkerüli a Földet. A 100 km-es magasság hivatalosan nem számít a világűr határának. Ennek ellenére az „űrgrások” tömeges végrehajtását ígérő magáncégek (*Scaled Composites*, *Planetspace*, *Rocketplane*, sőt az európai *EADS* is) segíthetnek abban, hogy meginduljon a magán-hordozóeszközök párhuzamos fejlődése. A kezdeti űrgrások tömeges sikere esetén azután az egész „orbitális űrturizmussá” fejlőd-



8. ábra. SpaceShipOne, az első magán-űrrepülőgép

hetne, saját hordozóeszközökkel, „űrhotelekkel” és infrastruktúrával. Természetesen ez a lehetséges űrturiztaprogram szintén csak a kezdet kezdetén tart még, és – akárcsak a „space exploration” maga – bármikor elakadhat, akár egy baleset hatására, akár gazdasági okokból. Hozzáteszem, hogy ezen a területen a jogi szabályozás is nagyon hiányos még: a *világűrjog*, amely lényegileg a hetvenes évek óta stagnál, és nem állt elő egyetlen új, kötelező érvényű nemzetközi megállapodással sem, adós még e tevékenység szabályainak megalkotásával.

Így áll tehát az űrtevékenység ötven évvel a kezdetek után. Nagy kérdés, hogy az űrkorszak adott-e új, globális identitást az emberiségnek, vagy csak a versengést, s vele együtt a nemzeti identitásokat erősítette? A történészek feladata lesz, hogy tisztázzák az űrtörténelem és a nemzeti történelmek kapcsolatát, illetve összefüggését az olyan folyamatokkal, mint a globalizáció. Annak eldöntése is a történészek feladata, hogy milyen politikai és gazdasági szerepet játszott az űrtevékenység a hidegháború korszakában, illetve az azt követő időszakban. A magam részéről meg vagyok győződve arról, hogy az elmúlt fél évszázad története nem írható meg anélkül, hogy értékelnénk a világűrbe való kilépés következményeit és tanulságait.

Irodalom

- Almár I.: Kutatómunka mesterséges holdakkal. *Fizikai Szemle* 7/2–3 (1957) 53.
 Almár I.: Új problémák és eredmények az asztronautika területén. *Fizikai Szemle* 9/10 (1959) 299.
 Almár I.: A Hold, a bolygók és a csillagok vizsgálata az űrkutatás eszközeivel. *Fizikai Szemle* 21/8 (1971) 248.
 Almár I., Both E.: A magyarországi űrtevékenység dióhéjban. *Fizikai Szemle* 54/3 (2004) 73.
 Almár I., Galántai Z.: *Ha jövő, akkor világűr*. Typotex, Budapest, 2007.
 Horváth A., Szabó A.: *Űrkorszak*. Ekren, 2007.

KUTATÁS – VERSENYKÉPESEN

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet 2007. októberében ünnepli jogelődje, az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete alapításának 50. évfordulóját. Ez egybeesik az MTA intézethálózati konszolidáció során a másik jogelőddel, a KFKI Anyagtudományi Kutató Intézettel végrehajtott egyesítés 10. évfordulójával. Köszönjük a *Fizikai Szemle* szerkesztőségének a lehetőséget, hogy a rendszeres publikációs megjelenéseken túl ebből az alkalomból koncentráltan is bemutatkozhatunk.

A jubiláló intézmény történetének áttekintése helyett álljon itt néhány, az alapítással kapcsolatos citátum. Az alapító igazgatónak, *Szigeti György* akadémikusnak az MTA Műszaki Osztályához címzett, az alapítás szükségességét szakmailag megindokoló előterjesztéséből idézünk 1956-ból:

„Az anyag szerkezetének megismerésére irányuló fizikai és kémiai kutatások eredményeképpen az utóbbi évtizedben olyan eszközök (anyagok) kerültek kifejlesztésre, melyek a híradástechnika, kohászat, villamosenergetika és a műszaki élet egyéb területein forradalmi változásokat hoztak létre, illetve az eddigi előjelek szerint létre fognak hozni.

Ilyen eszközök többek között:

a) A *tranzisztorok*, melyek nagyon sok területen az elektroncsöveket fogják kiszorítani; fűtőáramot nem ígér-

nyelnek, anódfeszültségük töredéke az elektroncsövekének, méretük rendkívül kicsiny, élettartamuk nagy.

b) Erőssáramú *félvezetők* és egyenirányítók, 97–99% egyenirányító hatásfokkal, 6–8 A/cm² egyenirányított árammal. Hírek szerint ezeket elektromos mozdonyok tápáramának egyenirányítására szándékoznak felhasználni, ami által nagymértékben egyszerűsödne az elektromos vontatás kérdése.

c) Félvezetők segítségével sikerült fénylemeket előállítani, amelyek a napfényt (jelenleg) maximum 11%-os hatásfokkal alakítják át közvetlenül elektromos energiává 110 W/m² energiasűrűséggel, és így a jövő energiaellátása szempontjából esetleg az atomenergiával egyenlő súllyal veendő tekintetbe.

d) Kísérletek folynak világszerte, amelyek arra látszanak utalni, hogy a félvezetők szerepe a világítás-technikában is döntő jelentőségű lesz (elektrolumineszcencia).

e) *Nagyon tiszta fémek és félfémek előállítása*, vizsgálata és ennek keretében a zónatisztítás és vákuumolvasztás technikájának alkalmazása. [...]

E problémakörrel való foglalkozás többek között azért kíván feltétlenül külön intézetet, mert *a problémák és a kutatási módszerek alapvetően különböznek a fizikában és kémiában eddig megszokottaktól*. E területen a kutatás az anyagtól kémiai tisztaság és

fizikai egyenletesség szempontjából több nagyságrenddel mást kíván, mint amit a korábbi követelmények támasztottak.”

A fentiek minden értékelésnél ékesszólóbban tanúsítják a javaslattevők bölcsességét, távolbalátását és a megfogalmazott szemlélet- és közelítésmód időtállóságát. Nem az intézet munkatársain és nem is a felvázolt területen dolgozó kutató-fejlesztő gárda lelkesedésén, felkészültségén és hozzáértésén múlt, hogy a Mikroelektronikai Vállalat 1986-os tűzesete kapcsán az egész magyar félvezetőipar és mikroelektronikai kutatás-fejlesztést ért végzetes csapás következtében a koncepció nem tudott kiteljesedni az élet által igazolt vízió szerint. Hazánkban a félvezetők kutatása méltatlanul szorult háttérbe, például máig sem működik dedikált félvezető-fizika tanszék egyik tudományegyetemünkön sem.

Az 1998-as intézetegyesítés során az MTA Közgyűlése által az MTA MFA számára jóváhagyott közfeladatként ellátandó alaptevékenység jelentősen módosult:

– Alap- és alkalmazott kutatás végzése az anyagtudomány és a műszaki fizika területén előírt szerkezetű és funkciójú anyagok és eszközök létrehozása, alkalmazása, valamint a kapcsolódó eljárások tudományos alapjainak feltárása érdekében;

– Szakemberképzés, szaktanácsadás a magyar tudomány képviselői a művelt területeken.

A 150 fős MTA MFA 1,6 Mrd Ft éves működési költségének csupán 35%-át kapta központi támogatásként 2006-ban. Az MFA 95 kutatója a *nano-, opto-, bio-, és mikrotechnológiai területek átfedéséből kialakuló*, rengeteg izgalmas új kihívást jelentő, de nagy preparatív és analitikai infrastruktúra működtetését igénylő *multidiszciplináris kutatási területen* a további szükséges forrásokat hazai és nemzetközi pályázatokból, ipari szerződésekből biztosítja – egyre nehezebben.

Ötven év elmúltával jólesően állapíthatjuk meg, hogy a kiváló tudományos iskolák, az itt nevelkedett tudósgenerációk és kiterjedt nemzetközi szakmai kapcsolatrendszerük révén intézetünkben minden nehézség ellenére sikerült számos kiemelkedő tudományos eredményt elérni, melyek küldetésünk sajátosságánál fogva a hazai gazdaság versenyképességét is javították. Ezt kívánják munkatársaink néhány múltbeli és aktuális kutatási téma ismertetésével – egyebek közt az elektronspektroszkópia, mágnesség, ion-sugaras analitika, spektroellipszometria, illetve nanostrukturalás területén – szemléltetni.

Budapest, 2007. október

Kádár György, Bársony István

EGYESÜLT ANYAGTUDOMÁNY

Az izzólámpától a nanocsövekig

Gyulai József

KFKI Mikroelektronikai Kutató Intézet, MKI, (1991-ig),

KFKI Anyagtudományi Kutató Intézet, ATKI (1997-ig),

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet, MFA (1999-től)

A kilencvenes évek elején két intézet korábbi súlypontjait újra kellett gondolni, mert nemcsak az ATKI termékpaletája irányult a keleti piac felé, de az MFKI¹ sok terméke is piacát veszítette. Világos volt az is, hogy két, a tudománypolitika szóhasználatában azonos, illetve hasonló profilú „anyagtudományi” intézetet az MTA aligha fog finanszírozni. Emellett mindkét intézet azon intézetcsoporthoz tartozott, amely vitálisan függött a zuhanórepülésben lévő külső, illetve ipari finanszírozástól.

Az MTA-ban ekkoriban lett megítélési prioritás a szcientometria. Ebből a szempontból mindkét intézményben csak korlátozottan voltak olyan szakmai iskolák, amelyek kiállták ezt a próbát: a vékonyréteg-felületfizika, valamint az elméleti (statisztikus) fizika az MFKI-ban és az ionimplantáció (benne az ellipszometria ilyen célú alkalmazásával), valamint a mágneses kutatások az ATKI-ban. A preparatív szakmák, a hozzájuk tartozó, rengeteg személyes intuícióval létrehozott és fenntartott, minősített légállapotú laborral, amelyek a

felszerelés évekkal való lemaradása, elöregedése miatt – ne szépítsük – általában csak „követő” kutatásra lehettek képesek, veszélybe kerültek. A hivatkozási, társ-szerzői szokások miatt még az élvonalbeli kísérleteket lehetővé tevő mintákat előállító laborok is csak ritkán kapják meg a megérdemelt „kreditet”.

A két intézet múltja, kapcsolatai ugyan sok pozitív eseményt rejtettek, de ellentmondásosak is voltak.

Újpest és Csillebérc – a korábbi kapcsolatok

Gyulai József saját személyében sokat köszönhetett az MFKI-s kollégáinak – már a szegedi életében. Később, a félvezető-tematikai „területkartell” KFKI-s áthágása megnehezítette számára a helyzetet – pláne, hogy kicsin múltott, hogy nem „KFKI-ba delegált MFKI-munkatársként”, hanem KFKI-sként indította meg itthon a félvezetős implantációs kutatásokat. Érthető, hogy folyamatosan igyekezett a helyzet életébe tompítani.

Ennek megfelelően már az 1974-es esztendőben delegált az MFKI vendégkutatót a KFKI² Implantációs Célprogramjához, Hermann László személyében, aki

¹ Műszaki Fizikai Kutató Intézet

² Központi Fizikai Kutatóintézet



1. ábra. Nagyfelületű pn-átmenet n-, illetve p-típusú szeletek direkt kötésével való előállítás. (Az illesztés $1,5^\circ$ -os, nem-szándékos rotációs hibája miatt, ahogy az várható is, minden 40. atomnál diszlokáció keletkezett; Pécz B., Gyulai J., Wiget R., Burte E.P.: Silicon direct wafer bonding, a TEM study. *Proc. EUREM-11*, Dublin, 1996, Vol. II. pp. 638–639.)

az implantált rétegek elektromos minősítésébe kapcsolódott be, segített a mérés technika helyi felépítésében is.

A munkából egy, sajnos „túlságosan is korai”, azaz akkor elsikkadt, a *Physica Status Solidi*-ban megjelent publikáció született, amelyet – mai definícióval – a *kombinatorikus anyagtudomány* egyik első megvalósulásának nevezhetünk. Az „anódos oxidációnak” ugyanis egy olyan változatát ismertük fel és valósítottuk meg 1974-ben, amelynél a szilíciumcsíkot egyenletes sebességgel mozgatva mérítettük be az anodizáló oldatba. Ekkor, a mozgatás révén, az oxidréteg ék alakban lineárisan vastagodva nőtt. Ezt az ékalakú oxidot eltávolítva, mindmáig rekordot jelentő kicsiny „menedékességű” „ferdeciszolat” állítható elő, ami a mai IC-méretekhez³ kiválóan illeszkedik.

A későbbiekben sok közös cikk született a két intézet munkatársainak együttes munkája eredményeként – néhány példát kiragadunk. Az 1. ábra egy kiemelkedő mikroszkópos teljesítményt mutat be. Nagy teljesítményű diódák előállítását célozták akkoriban a p- és n-típusú szeletek direkt szeletkötéssel való „összeragasztására” végzett kísérleteink. Ez az egyik esetben a két szelet hőkezelésekor kis mértékben ($1,5^\circ$) elfordult. Pécz Bélának sikerült a mintegy fél mm vastag diódaszervezet közepén a félreorientálódás miatt periodikusan fellépő diszlokációkat megtalálnia!

A Silicon-On-Insulator (SOI), amely a SOS-nek⁴ a nyolcvanas években kutatott több variánsát jelentette – esetünkben a lézeres olvasztásos laterális epitaxiáról volt szó – szintén jelentős kooperációvá nőtte ki magát.

Hasonlóan, az MFKI III–V félvezető eszközkutatásai jól tudták hasznosítani a KFKI-ban kifejlesztett analitikai eljárásokat. Több közös publikáció született a GaAs-eszközök kontaktusainak kialakítására is, a vékony oxidrétegeknek úgynevezett rezonancia-RBS-szel⁵ való kimutatására, valamint a gyorsan fejlődő KFKI-s ellipszometria-i készség és tudás hamar megtalálta az MFKI kutatóit, mint együttműködő partnere-

ket a III–V-típusú félvezetős programjaik támogatásában: Fried M., Horváth Zs. E., Jároli E., Lohner T., Mezey G., egyfelől, Barna P. B., Farkas-Jahnke M., Pécz B., Radnóczy Gy., Somogyi M., Veresegyházy R., Tóth A. másfelől.

Az „Eötvös” Űrtechnológiai Program

A két intézet hivatalosan is intenzív együttműködését ez a program jelentette.

Anekdotaszerűen: az, amikor az Interkozmosz javaslatokat kért a szovjet–magyar űrrepülés kapcsán végrehajtandó magyar kísérletekre, éppen akkor volt, amikor egy amerikai gimnazista diák a pók hálópítési képességének a súlytalanság közepette való vizsgálatát javasolta. A KFKI félvezetős kutatói ezt tekintették zsenialitási normának – nem is javasoltak űrkísérletet. 1979 őszén azonban az Interkozmosz szervezet kifogásolta, hogy hazánk nem tett javaslatot az űrkemencében végezhető technológiai kísérletre.

Szabó Ferenc akkori KFKI főigazgató Gyulai Józsefet küldte ki Moszkvába ennek a korrigálására, aki Fuchs Erik professzort találta ott, a „BEALUCA” programjavaslattal. Mikor a „SZPLAV” űrkemence műszaki paraméterei kiderültek, látszott, hogy a KFKI Implantációs programjának szilíciumos témáihoz értelmesen illeszkedő kísérletet azzal aligha lehet végezni. Az alacsonyabb olvadáspontú III–V-vegyületek, azaz az MFKI súlyponti anyagai azonban lehetőséget kínáltak. Akkoriban telefonbeszélgetésre még nem lehetett gondolni, ezért Gyulai József helyben megfogalmazott három kísérletet, amelyben azonban kardinálisan az MFKI kutatóira, az ő „igen”-jükre kellett számítani. Nevet is adott a programnak, az „ötözés”-re is utalva, „Eötvös” Programnak nevezve.

A három kísérlet:

- Fluxszal való folyadékfázisú epitaxiás (LPE) GaAs-növesztés „felszigetelő” GaAs-re,
- GaSb mag nélküli kristályosítása (e két kísérlet akkor újdonság volt),
- kontrollképpen megismételni a NASA InSb növesztési űrkísérletét.

Nagy öröme itthon Lendvay Ödön és munkatársai teljes mellszélességgel a javaslat mellé álltak, és gyors tempóban elindultak az előkészítő munkák, amelyekben a kristályok előkészítését az MFKI, az űrkapszulázás, biztonságtechnika, kapcsolattartás a KFKI feladata lett.

Érdekességként említjük, hogy a biztonságtechnikai kérdések, de az esetleges sikertelenség esetére a szovjet oldali felelősség elhárítása miatt is emlékeztetek Fuchs Erik és Gyulai József vitái az Interkozmosz munkatársaival, például a kemence hőmérsékletének kontrollja ügyében. Azt kérték, mi mondjuk meg, milyen hőmérsékletet állítson be Farkas Bertalan a kemence kontrollpaneljén. Szerintünk a mi feladatunk csak a kapszula belső hőmérsékleti mezőjének megtervezése volt – az, hogy milyen felirátú gombot kell megnyomni, az ő felelősségük. Nem adtak

³ Integrated Circuit – integrált áramkör

⁴ Silicon-On-Sapphire

⁵ Rutherford Backscattering Spectrometry, az oxigénatomokon a 2,03 MeV energiájú alfa-részecskék rezonáns hatáskeresztmetszetet mutatva szóródnak.

ugyanis lehetőséget olyan földi kísérletekre, amellyel a kontrollpanelen beállított és a kapszulában létrejövő hőmérséklet kapcsolataira egyáltalán következtetni lehetett volna. Ez okozta végül, hogy a GaAs-kísérletnél „elszaladt” a hőmérséklet. A két másik növesztés azonban sikeres lett, amint fentebb írtuk, több cikket eredményezett az elkövetkező években – bár végig abban a tudatban kellett dolgoznunk, hogy folytatásra aligha lesz lehetőség (2. ábra).⁶

A „végkifejlet”: az MFA létrejötte

Már a kilencvenes évek elején beszédtema volt az intézetek igazgatói között, hogy a hazai anyagtudományi, ebben a félvezető, optikai, fémkutatásoknak a súlya jelentősen megnőne, ha az MFKI és az ATKI közös telephelyen folytatná a tevékenységét. Abban is egyetértés volt, hogy a kilencvenes évek eleji tudománypolitikai helyzetben a KFKI Campus lenne a jobb telephely, de – és ebben sem lehetett a két igazgatónak egyet nem értenie – a költözésre az MFKI munkatársainak csak egy töredéke vállalkoznék, elsősorban a lakáshelyzetük miatt. Emellett volt olyan pszichológiai gát is, hogy az MFKI, átgondoltabb tudománypolitikája eredményeképpen, több tudományosan minősített munkatárssal rendelkezett, így a munkatársak tartottak attól, hogy egy új telephelyen valamiféle „alárendelődés” következne be. Ennek ellenére tárgyalt a két igazgató az MTA főtítkárával, érdeklődött a költözés anyagi fedezetének biztosításáról. A válasz azonban ekkor csak nemleges lehetett.

Pár évvel később viszont, az *intézetkonszolidáció* idején, 1997-ben, a kérdés élesen vetődött fel. Határozott szándékot láttunk az MTA Konszolidációs Bizottságában a Föti úti telephely felszámolására, és mind az MFKI, mind az ATKI esetében a jó szakmai csoportoknak valamelyik KFKI-intézetbe történő beolvasztására, a többi részlegnek a felszámolására. Az indító átvilágításnál ugyanis az 1992–95-ös időszakot vették alapul, amikor az ATKI-beli változások – például a tudományos fokozatszerzés központba állítása – még éppen csak elkezdődhettek, illetve azok hatása még alig jelentkezhetett a szcientometriai mutatók terén. Az alkalmazott kutatást célnak tekintő korábbi évek során ugyan született sok-sok publikálható, illetve disszertálásra alkalmas eredmény, de ezek beérlelését a határidős feladatok általában, és éppen a „legjobban húzók” esetében, megakadályozták.

A döntő érvelés, amely az önálló intézeti létért való lobbizást motiválta az volt, hogy az ATKI unikális tiszta laborját a két intézet „jó” részlegeit befogadni kész



2. ábra. A kapszulanyítás az Eötvös-kísérletben: az acélkapszula, alatta a kissé kihúzott kvarcampaulla, azután a fedél és a GaSb ampulla, végül a GaAs ampulla.

KFKI intézetek (SZFKI, RMKI) akkori vezetői – a labor fenntartásának költségességére hivatkozva – nem vállalták. Végül sikerült az MTA vezetését és mindkét felelős tudományos Osztályt (Műszaki, illetve Fizikai Tudományok Osztálya) meggyőzni egy komplex anyagtudományi intézet szerepének fontosságáról. Ezek után döntött a Konszolidációs Bizottság a KFKI telephelyen való egyesülésről. Pénzügyi-technikai okok miatt olyan döntést kellett azonban hoznia, amely szerint a KFKI-ATKI szűnik meg jogutód nélkül, és az MFKI jogfolytonosan, új telephelyen és névvel, *MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet*ként, folytassa a munkáját az ATKI munkatársaival vegyülve. Ezzel megkapta mindkét intézet az esélyt, hogy az értékeik szinergikusan átmentődjének.

A két igazgató megegyezett, hogy – kinevezett igazgatóként – Gyulai József vállalja az egyesítés szakmailag is nehéz, de emberileg még nehezebb feladatát. Sőt, szerette volna a szinergizmust már a költözéskor érvényre juttatni, de a KFKI Campuson korábban kialakult helyzet (alkalmasan átalakítható épületek léte, bérlőkkel kötött szerződések, illetve pénzügyi korlátok) csak mértékkel tette lehetővé a szigorúan tematikus elhelyezést.

Az emberi, lelki gondot az okozta, hogy a megadott konszolidációs létszám mintegy százhusz fővel volt kevesebb a két intézet együttes létszámánál. Az egyesítés szinte lehetetlen, a katasztrófát súroló feladata amiatt volt egyáltalán vállalható, mert bekövetkezett az az előre is látott gond, hogy az újpesti illetőségű technikai személyzet megretten a közlekedési nehézségektől és inkább a végkielégítést választja. A kutatók átköltöztetése 1997 végén – néhány fájdalmas döntéstől eltekintve – megoldható volt. Így, 1998 első munkanapján, egy intézeti gyűléssel megkezdődött a közös élet. A segéderők hiánya nehezen, de például nyugdíjas foglalkoztatásokkal, preferált felvételekkel lassan enyhült.

Az intézetek szinergikus megerősödésében volt még egy fontos faktor. Az ATKI-ban már korábban is jól szervezett szemináriumi élet folyt, hetenkénti, külső-belső előadókka, *Kádár György* szervezésében. Természetesen kínálkozott ennek az MFA-ra való átvitele, továbbbővítése. A rendszeres, szinte kimaradásmentes, tematikailag tudatosan vezérelt program eredményesen hozzájárult az egyesült intézetek összefonódásához.

Külön meg kell említeni *Somogyi Istvánnét* – egy

⁶ Ebben, szerencsére, tévedtünk: a két program közös konklúziója ugyanis az volt, hogy a szovjet űrhajók klímái 10^{-3} g körüli rezgést okozva, zavarják a kristályosodást. Fuchs Erik ötlete volt, hogy mechanikai mozgás nélküli kemencét kellene építeni, a zónák hőmérsékletét computeres vezérléssel kell megoldani (ez 1982-ben már reális lehetőségnek látszott) és egy külső platformra kitenni. Innen indult el a máig sikeres hazai űrkemence-program (ma a Miskolci Egyetemen).

Külön meg kell említeni *Somogyi Istvánnét* – egy megszűnő KFKI-intézet, az MSZKI⁷ korábbi gazdasági vezetőjét –, aki vállalkozott a gazdasági igazgatói szerepre, és aki le tudta vezényelni mind pénzügyileg, mind humánpolitikai ügyintézőként a rövid távon rendkívül hálátlan feladatokat.

Az MFKI laborjai, témái közül néhány azonban felszámolódott, átalakult, például kisvállalattá. A legnagyobb költözési veszteség két MFKI-s témát érintett: a vegyületfelvevő kutatást, ugyanis az úgynevezett MOCVD-technika⁸ áttelepítésének környezetvédelmi szempontjai a budai hegyekben teljesíthetetlennek bizonyultak (csak az LPE-technikát tudtuk áttelepíteni), valamint a magas olvadáspontú fémek kutatásának témáját. Ez utóbbi, korábban súlyponti és rendkívül sikeres

⁷ KFKI Mérés- és Számítástechnikai Kutató Intézet

⁸ MetalOrganic Chemical Vapor Deposition

⁹ Hányódtunk, de nem merülünk el...

témánál az ipari érdeklődés lecsökkenése és a tudományos utánpótlás szinte teljes hiánya miatt kellett a laboratóriumok áttelepítésétől eltekinteni. De a leginkább értékesíthető eredményt, a környezetbarát volfrám-, illetve molibdén-visszanyerésnek a szabadalomértékű megoldását (*Vadasdi Károly*) egy, az MFA-val szoros együttműködésben álló kisvállalkozásban (Tungslab) sikerült túlélteni és sikerre is vinni.

A jelen összeállítás további fejezetei alapján a Tisztelt Olvasó eldöntheti, hogy a küzdelem megérte-e? Különösképpen ma, az új, az uniós Magyarország gazdasági nehézségeinek kulminálása idején éles a kérdés, amikor a következő ötven év elérését kell a mai vezetésnek a célkeresztbe állítania – a szakmának az emberiség összérdekében játszott szerepe fontosságának tudatában.

A tudásunk ma is eladható – és ezen írás idején látszik, hogy az ötven év beértett.

„Fluctuavimus, nec mergimur”⁹

ELEKTRONTRANSPORT-PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

A LEED-től az EPES-ig

Gergely György, Gurbán Sándor,
Sulyok Attila, Menyhárd Miklós

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Hazánkban a felületfizikai kutatások 1968-ban kezdődtek. 1967-ben *Szigeti György* akadémikus javaslatunkra jóváhagyta egy akkor korszerű, ultravákuumban (10^{-10} mbar) működő, fékező rácson analízátor (RFA) beszerzését, amit 1968-ban üzembe helyeztünk. A nemzetközi felületfizikai kutatások atomosan tiszta felületeken a 60-as években indultak. A legtöbbször alkalmazott kísérleti módszer a kisenergiájú elektron-diffrakció (LEED) volt. Az 1964-ben induló *Surface Science* folyóirat első számában az első oldal *Farnsworth* LEED-közleményével kezdődik.

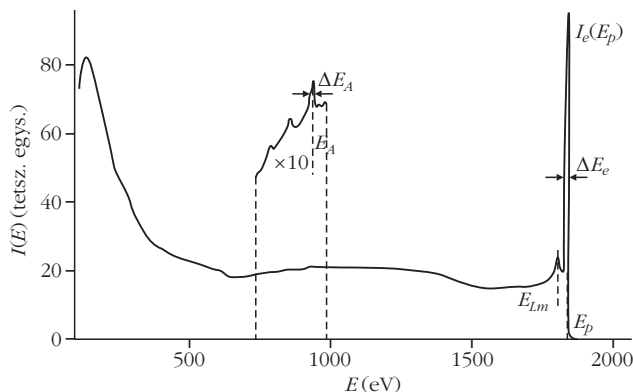
1968-ban a felületfizikában forradalmi újdonság volt *L. Harris* cikke, az Auger-elektronspektroszkópia megjelenése. Ennek nemzetközi jele AES, *N. Taylortól* származik, aki a Varian cég LEED-berendezését továbbfejlesztve megvalósította, és kereskedelmi forgalomba bocsátotta az első Auger-spektrométert.

Az AES történetéről közlemény jelent meg a *Fizikai Szemlében* [1]. Rövidesen a Varian után a VG is elkészítette a kiegészítő elektronikai egységeket 4 rácson RFA-spektrométeréhez AES célra. Javaslatunkra *Szigeti* akadémikus jóváhagyta VG-spektrométerünkhöz az AES elektronika beszerzését, az akkori devizahiány miatt azonban ez csak 1973-ban valósult meg [2]. Az RFA-spektrométerek mellett *Palmberg* (Physical Electronics) már 1969-ben kifejlesztette a hengeres tükör (CMA) spektrométert, nagymértékben javítva az Auger-spektrométer energiafeloldását és érzékenységét. A Riber OPC 103 CMA beszerzését az MFKI-ban 1977-

ben sikerült megvalósítani. Ehhez a Riber cég UHV-kamrarajzot is adott. A teljes mérőrendszert az MFKI-ban építettük fel, a Tungslab Kutatóval és a KFKI-val együttműködve. A spektrométer UHV-kamrát *Barla Endre* vezetésével *Zalaba Andor* és munkatársai építették meg, a KFKI elektronikát *Tóth Ferenc* fejlesztette ki számunkra. A KFKI NV-255 szinkron detektorát alkalmaztuk. MFKI-fejlesztés volt a spektrumok felvétele analóg üzemmódban [3].

A további fejlesztéssel a KFKI 1024 csatornás analízátorához az MMG SAM 85 kisszámítógépet csatlakoztattuk, így megvalósult a spektrumok automatikus gyűjtése és adatfeldolgozása. 1998-ban helyeztük üzembe a Staib DESA 100 típusú spektrométert. Nem részletezzük a továbbiakban az alkalmazott mérőberendezéseket. Kutatásaink jelentős hányadát az MTA ATOMKI-val együttműködve végeztük, az ATOMKI által kifejlesztett ESA 31 félgömb (HSA) spektrométerrel, melynek kiváló az energiafeloldása, de igen kicsi és energiafüggő a detektálási szögtartománya.

A felsorolt spektrométerekkel végeztük a felületek és vékonyrétegek kvantitatív AES-elemzéseit, az energiavesztései spektrometriát, valamint a közleményünkben ismertetett transzportparaméterek meghatározását, főként a rugalmas elektronszórás spektrometria (EPES) segítségével. A továbbiakban atomosan tiszta felületekről beszélünk. A közleményünkben LEED és AES-sel kapcsolatos fogalmak megtalálhatók két tanulmányunkban [4, 5].



1. ábra. Egy tipikus emissziós spektrum, amit E_p energiájú primer elektronokkal gerjesztettünk.

Elektrontranszport-paraméterek

Szilárdtest felületét elektronokkal bombázva a kilépő elektronok folytonos $N(E)$ spektrumot alkotnak, melyre lényegesen kisebb intenzitású csúcsok rakódnak. Az 1. ábra tipikus spektrumot mutat, mely $E = 0$ és E_p (primer) energia között 3 tartományt fog át. 50 eV alatt szekundér elektronok (SEE) keletkeznek. Az 50 eV ISO-szabvány, ezen elektronok integrálja a szekundéremissziós tényező, anyagi paraméter. Ezzel nem foglalkoztunk.

Az 50 eV – E_p tartományban a folytonos spektrumot a visszaszórt elektronok alkotják. A rugalmas+rugalmatlan (energiavesztéses) szórt elektronok integrálja a visszaszórás hozam (backscattering yield, BY) anyagi paraméter (ISO 18115/5.94:2001), melyet az E_p energia és a primer elektronok beesési szöge határoznak meg. A teljes féltérre vonatkozik. BY számításával és mérésével gazdag irodalom foglalkozik. Spektrométerünk azonban csak kis szögtartományban detektálja az elektronokat. Saját $N(E)$ spektrumainkat a Riber OPC 103 CMA-val vettük fel [3], a detektálás szögtartománya $42 \pm 4^\circ$, a primer elektronok merőlegesen érik a mintát. Így a detektált elektronok a teljes BY kis hányadát jelentik csupán. Az $N(E)$ spektrumokból határoztuk meg az AES anyagi paraméterét, az Auger-visszaszórás tényezőt (ISO 11815/5.90) [3]. Az $N(E)$ spektrumok kvantifikálása jelenlegi kutatásaink egyik témája.

Tekintsük át a transzportfolyamatokat. A belépő vagy távozó elektron a felületen energiavesztést szenved. Az anyag belsejében kölcsönhat, szóródik az atomokon. A szórás lehet rugalmas (vesztés nélkül), vagy rugalmatlan. A rugalmas szórás hatáskeresztmetszete nagyobb, mint a rugalmatlané. A két szórás között megtett közepes úthosszat szabad úthossznak nevezzük. A rugalmas szabad úthossz $\lambda_e < \lambda_i$ rugalmatlan szabad úthossz (IMFP). Az elektron pályáján eléri λ_{rt} , majd energiája csökken.

Az elektron pályája folyamán még sok szóródást szenved, energiája eléri a SEE-tartományt. Minden egyes rugalmas szórás folyamat lényeges irányváltást is eredményez, mely végül meghatározza az elektronok szögeloszlását. Egyetlen rugalmatlan szórás után az impulzus megmaradása következtében az elektron csekély irányváltást szenved.

Az elektronok kis hányada (néhány százalék) csupán rugalmas szórást szenved, majd eljut a felülethez és kilép. Ezek alkotják a rugalmas csúcsot, energiájuk $E = E_p$. $N(E_p)$ a legintenzívebb csúcs a spektrumban. A rugalmas csúcs elektron-spektrometria az MFKI eredménye [6]. 1981 óta folyamatosan fejlesztjük, ma már 34 kutatóhely foglalkozik vele, 2006-ban összefoglaló közleményünk jelent meg [7]. Jele EPES (ISO 18115/7.26:2001/PDAM 2).

A transzportfolyamatokat Monte-Carlo (MC) számítással szimuláljuk [6]. A MC-analízis felhasználja a NIST (National Institute of Standards and Technology) SRD 64 (rugalmas elektronszórás), továbbá SRD 71 (IMFP) adatárakat. Az MC-szimuláció a következő kísérleti eredményekre terjed ki: a teljes $N(E)$ spektrumok, az Auger-visszaszórás tényező, az $N(E_p)$ rugalmas csúcs, a veszteségi spektrumok, mindezek integrálja a 2π térféltre, továbbá szögeloszlása. Itt szembesülünk a kísérleteknél használt elektron-spektrométerrel, annak szögviszonyaival. Általában a spektrométer csak kis szögtartományban detektálja az elektronokat. Lényeges a spektrométer $R(E)$ válaszfüggvénye, illetve $T_r(E)$ transzmissziója.

Veszteségi és emissziós csúcsok

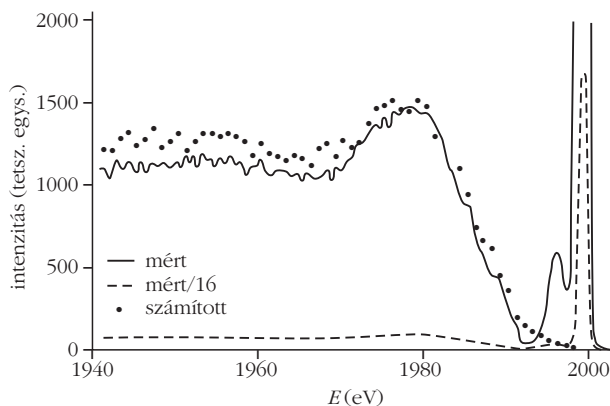
A folytonos $N(E)$ spektrumra meghatározott E energiáknál igen kis intenzitású csúcsok rakódnak. Ezek:

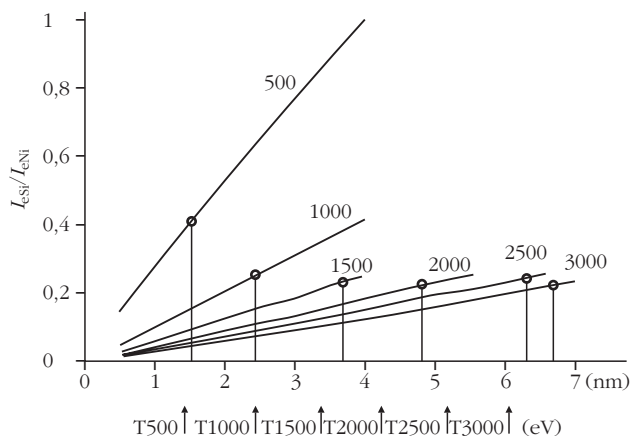
- Ionizációs, veszteségi csúcsok, az ionizációs spektrometria (ILS) foglalkozik velük. Az ATOMKI ESA 31 spektrométerével kis könyökként jelent meg az $N(E)$ spektrumban a Si és a Ni törzselektronjának gerjesztésénél [7].

- Az EA Auger-csúcsok anyagi paraméterek, energiájuk független E_p -tól. Értékük megtalálható kézikönyvekben, adattárakban. Az Auger-elektron-spektroszkópia (AES) a felületi és vékonyréteg-analízis hatékony módszere [5].

- Az E_p közelében elhelyezkedő veszteségi tartományt az anyag veszteségi függvénye, a dielektromos függvény képzetes része határozza meg. Az REELS, veszteségi spektrometria reflexiós módban szolgáltatja a kísérleti eredményeket. A 2. ábra mutatja polietilén számított és mért REELS–EPES spektrumát, mely-

2. ábra. A polietilén számított és mért REELS–EPES spektruma. A hidrogén jelenléte miatt észleljük a felhasadást.





3. ábra. Mestergörbék a Si/Ni-re különböző E_p energiák mellett, amelyekből a fejlettebb szoftverek megjelenése előtt a rugalmatlan szabad úthosszt meg lehetett határozni.

nek érdekessége, hogy a rugalmas csúcs felhasad és a hidrogén rugalmas csúcsa megjelenik a visszalökési hatás következtében [6]. Az MFKI–ATOMKI–Varsóval közös munkánkban elsőként észleltük az elektron-spektrumban a H-t. A transzportfolyamatok MC-szimulálása *Sulyok Attila* eredménye.

Az összes felsorolt csúcsokhoz tartozó elektron felületienergia-veszteséget szenved, mely a csúcs intenzitását csökkenti. Ugyanez érvényes a folytonos $N(E)$ spektrumra is.

Fizikai transzportparaméterek kísérleti meghatározása

A következőkben három transzportparaméterről szólnunk, melyeket EPES, illetve REELS–EPES alkalmazásával határoztunk meg:

Rugalmatlan szabad úthossz

A kvantitatív felület- és vékonyréteg-elemzés alapvető paramétere az IMFP λ_i rugalmatlan szabad úthossz. Az elemzés információs mélységét, tartományát az IMFP határozza meg. Az elektronok szökési mélysége, vagy csillapodási hossza $\lambda_a < \lambda_i$, a többszörös rugalmas szórás következtében. Már 1981-ben, első EPES-közleményünkben [6, 7] kimutattuk, hogy a rugalmas csúcs intenzitását λ_i határozza meg a rugalmas visszaszórással együtt. 1984-ben az LTA Fizikai Kémiai Intézetével közös munkánk volt λ_i kísérleti meghatározása EPES segítségével, akkor még Al referenciaminta segítségével. Később több, jobb referenciát használtunk és fejlesztettünk ki [6, 7]. 1989-ben *Alexander Jablonskival* közös munkánk volt a kvantitatív eljárás [8]. Jablonski fejlesztette ki a MC-analízist. Akkor még számított mestergörbét használtunk, a mért rugalmas csúcs arányt számította Jablonski a λ_i szabad paraméter függvényében. A 3. ábra mutat ilyen mestergörbét Si/Ni-re, különböző E_p energiák mellett. Ma már Jablonski EPESWIN programcsomagjával dolgozunk.

Az IMFP-ről Jablonski és Powell (NIST) tanulmányt közöltek, összefoglalva az addigi eredményeket. Jav-

solták az EPES-eljárás alkalmazását λ_i kísérleti meghatározására. 1999-ig és azóta is ezt alkalmazták a Clermont-Ferrand, Tübingen, Stuttgart Hohenheim, TU Wien, Boroszló, Szentpétervár stb. egyetemeken. Akkor még elhanyagolták a felületi veszteségeket. Számos fémre (Ni, Cu, Ag, Au, W stb.), félvezetőre (Si, Ge, III–V) és néhány szigetelőre (SiO_2 , MgO, Al_2O_3 stb.) határoztuk meg $\lambda_i(E)$ -t a nagyszámú külföldi munka mellett. Kiemeljük az LTA Fizikai Kémiai Intézetével vezető poliméreken végzett vizsgálatainkat.

Felületi gerjesztési paraméter (SEP)

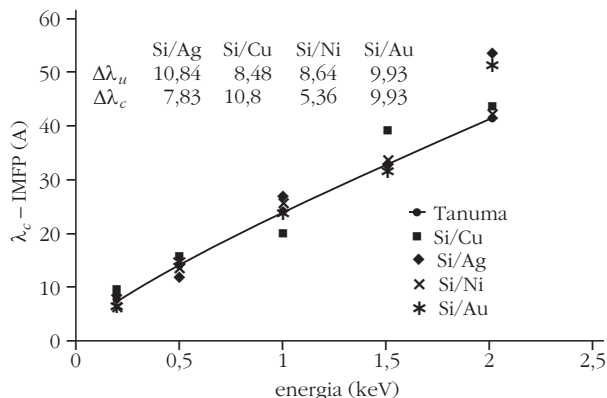
2007-ig a referenciaminta-módszert használtuk, de már 2004-ben kezdtük a felületi veszteségi korrekciót. Itt jutunk el a felületi veszteségi paraméterhez (SEP), melyet javaslatunkra már az ISO is definiált (18115/7.74:2001/PDAM 2). A SEP-paraméter jelenti a felületen áthaladó elektron által gerjesztett elektronok számát, mely Poisson-típusú folyamat. A rugalmas csúcs intenzitását csökkenti a számított, elméleti értékhez képest (NIST TPP-2M). A SEP anyagi transzportparaméterből származtatható, energia- és szögfüggő. A SEP-re több képlet és modell található az irodalomban, azonban mindegyik egyetlen anyagi paramétert tartalmaz. A 4. ábra összehasonlítja Si SEP-pel korrigált λ_i értékeit a nem korrigált adatokkal, Ag, Cu, Ni és Au referenciamintával [9], az ATOMKI-val és Jablonskival közös eredményünket. A SEP-paramétert részben *Chen* alapján határoztuk meg, szintén minta és referencia rugalmas csúcsainak felhasználásával. Saját eredményünk a Ni SEP anyagi paramétere, melyet *Nagatomi* REELS-vizsgálatai megerősítettek.

Rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszet

Sven Tougaard a rugalmas csúcsot használva referenciának meghatározta a $K\lambda_i$ függvényt. K az elektron energiavesztesége 1 cm úthossznál és E energiánál. Tougaarddal együttműködve határoztuk meg a $K\lambda_i$ kísérleti eredményeket Si, Ge és III–V (GaAs, InAs, GaP, InSb) félvezetőkre.

A $K\lambda_i$ függvényt az anyag optikai állandóiból számítják. Tougaard jó egyezést talált számos anyagra. A

4. ábra. A SEP-pel korrigált rugalmatlan szabad úthossz, λ_i -értékek Ag, Cu, Ni és Au referenciaminták esetén, valamint a TPP-2M-mel meghatározott érték.



tömbi veszteségi függvény félvezetők (Si, Ge stb.) és néhány fém (pl. In, Sb stb.) esetében egyetlen plazmoncsúcs. Erre rakódik a felületi plazmon csúcsa, melynek leválasztására eljárást dolgoztunk ki [10]. Itt említjük, hogy GaSe plazmon csúcsát már 1973-ban RFA-spektrométerünkkel észleltük. A legtöbb anyag esetében a veszteségi függvény bonyolult.

Köszönetnyilvánítás

Az itt ismertetett kutatásokban részt vett Orosz Gábor Tamás (MFA), Tóth József, Varga Dezső, Kövér László, Tőkési Károly (ATOMKI, Debrecen), Alexander Jablonski, Beata Lesiak, Mirosław Krawczyk, Lubomir Zommer (LTA Varsó), Bernard Gruzza, Luc Bideux, Christine Robert, Paul Bondot (Clermont-Ferrand), Swen Tougaard (Odense, Dánia), akikkel számos közös közleményünk jelent meg. Az együttműködést nagyra becsüljük.

Irodalom

1. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 53/9 (2003) 331.
2. Gergely Gy., Menyhárd M., Németh K.: A szilárdtestkutatás korszerű berendezései. *GTE Konferencia*. Budapest, 1973. 21.
3. G. Gergely, B. Gruzza, M. Menyhard. *Acta Phys. Hung.* 48 (1980) 337.
4. Menyhárd M.: Kisenergiájú elektron diffrakció (LEED). In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 7–10.
5. Gergely Gy.: Szekundermissziós spektrometria, AES, SEES, ELS. In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 107–174.
6. G. Gergely. *Progr. Surf. Sci.* 71 (2002) 31–88.
7. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 369.
8. A. Jablonski, B. Lesiak, G. Gergely. *Phys. Scripta* 39 (1989) 363.
9. G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban, J. Toth, D. Varga, A. Jablonski. *J. Surf. Anal.* 12 (2005) 14.
10. G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban, A. Sulyok, J. Toth, D. Varga, S. Tougaard. *Solid State Ionics* 141–142 (2001) 47.

MIKROMÉRETŰ MONODOMÉNES RÉSZECSKÉK MÁGNESES VISELKEDÉSE

Vértesy Gábor

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Pardaviné Horváth Márta

George Washington University, Washington DC, USA

A kisméretű mágneses részecskékből álló kétdimenziós periodikus rendszereknek nagy gyakorlati jelentősége van a jövőbeni, extrém nagy sűrűségű mágneses adattárolók, mágneses MRAM memóriák és szenzorhálózatok megvalósításában. Ezért az ilyen rendszerek létrehozása, valamint mágneses viselkedésük vizsgálata komoly gyakorlati jelentőséggel bír. Másrészt ezen mágneses rendszerek tanulmányozása nagy segítséget jelent az elméleti hiszterézismodellek fejlesztésében, valamint az egymással kölcsönható mágneses részecskék viselkedésének jobb megértésében is. Az alábbiakban bemutatunk egy ilyen rendszert, és röviden összefoglaljuk az azon elvégzett mérések és modellezések néhány eredményét.

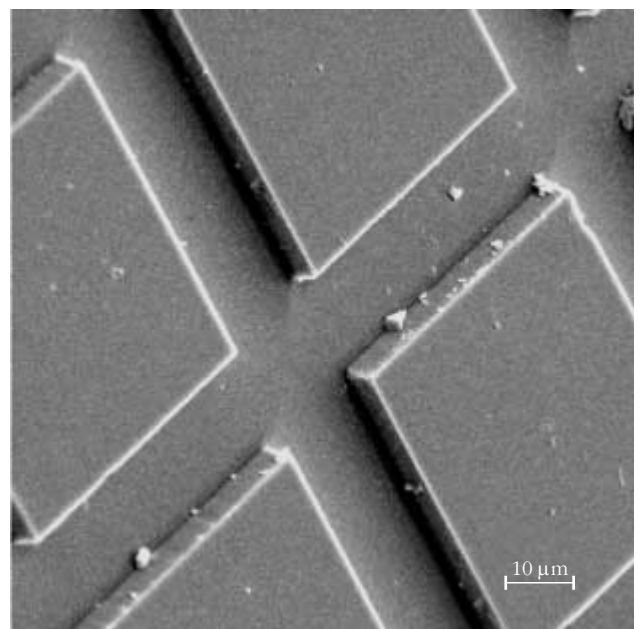
Mágneses szigetek kialakítása nem-mágneses hordozón, és tulajdonságaik mérése

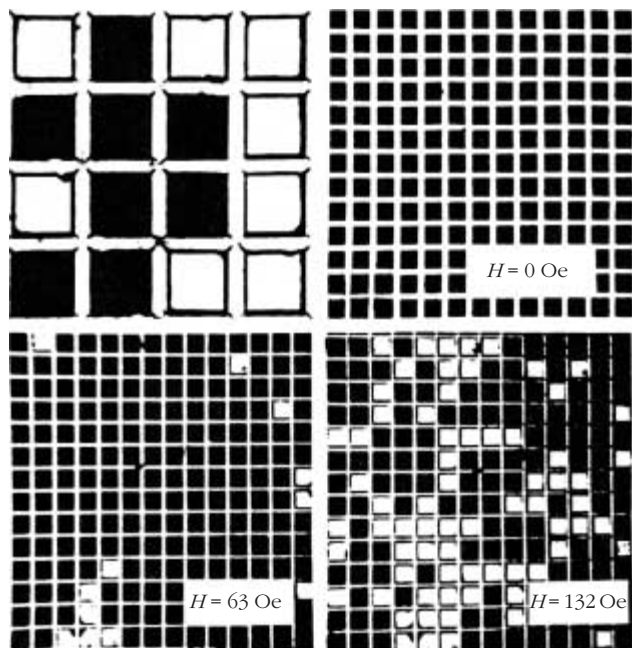
Nem-mágneses hordozóra folyadékfázisú epitaxiás módszerrel növesztett, néhány mikrométer vastagságú, egykristályos mágneses gránátrétegben, megfelelő maszkolás és az azt követő kémiai marás segítségével létrehozhatók egymástól elkülönülő, szabályos négyzet alakú szigetek (pixelek). A pixelek pásztázó elektronmikroszkópban felvett képét mutatja az 1. ábra.

A mágneses gránátrétegekben az összetétel módosításával jelentős egytengelyű anizotropia alakítható ki, amely biztosítja, hogy a mágnesezési irány merőleges a rétegek felületére. A marás utáni struktúrában a szigetek közötti utcák elkülönítik egymástól a mágneses részecskéket, ezért köztük nincs kicserélődési kölcsönhatás.

Az egyedüli csatolás a pixelek között a magnetosztatikus kölcsönhatás. Az egyes pixelek, a nagy egytengelyű anizotropia, valamint a kisméretű szigetek következtében, monodoménes módon viselkednek, azaz a pixelek mágnesesen telítettek, és az egyik telített állapottól kapcsolhatók át ellentétes irányú és megfelelő nagyságú külső mágneses térrel a másik, ellenkező irányban telített stabil állapotba. A gránátrétegek a nor-

1. ábra. Gránátrétegben marással kialakított pixelek elektronmikroszkópos képe.



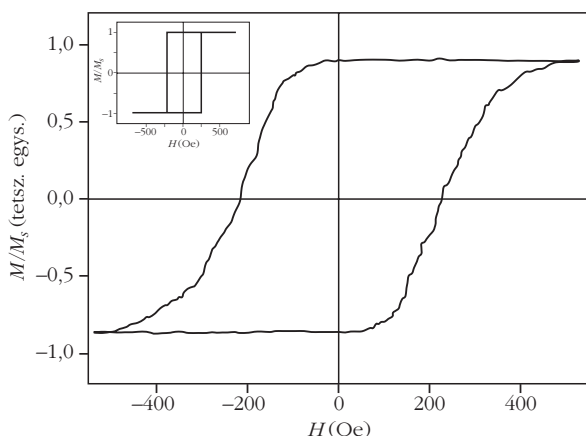


2. ábra. A pixelek csoportjának polarizációs mikroszkópban felvett képe, különböző külső mágneses térben.

mál hullámhosszú fény számára átlátszóak, ezért polarizációs mikroszkópban közvetlenül megfigyelhető a mágneses doménszerkezet. Ilyen felvételek láthatók a 2. ábrán, ahol a bal felső sarokban egy 16 pixelből álló együttes képe látható. A fekete és fehér kockák az ellentétes irányban mágnesezett pixeleket jelentik. A több pixelt tartalmazó másik három kép pedig azt mutatja, hogy az előzőleg nagy mágneses térrel létrehozott telített állapotból (csupa fekete pixel), nulla térről indulva ellentétes külső mágneses tér hatására hogyan mágneseződnek át fokozatosan az egyes pixelek (fehér kockák megjelenése).

Létrehoztunk egy olyan mérési elrendezést, amelynek segítségével közvetlenül mérhető a pixeleket tartalmazó gránáttréteg mágnesezettsége, továbbá az egyes részecskék viselkedése külön-külön is megfigyelhető és mérhető. A mérés magnetooptikai elven alapul (hasonlóan a polarizációs mikroszkópban ké-

3. ábra. Néhány száz elemből álló rendszer teljes mágnesezési görbéje (fő ábra) és az egyes pixelek tipikus mágnesezési görbéje (bal felső sarok).



szült felvételekhez), és azt a fizikai jelenséget használja ki, hogy a lineárisan poláros fény polarizációs síkja a mágneses anyagon való áthaladás közben a mágnesezettséggel arányos módon elfordul. Ily módon a mágnesezettség változása közvetlenül, a fényintenzitás mérése alapján nyomon követhető. A 3. ábra magnetooptikai módon mért mágneses hiszterézisgörbét mutat. A mérés több száz pixelt tartalmazó gránáttrétegen lett elvégezve. Minden egyes pixelnek azonban, a fent leírt okokból, négyzetes hiszterézisgörbéje van, és a makroszkopikus hiszterézisgörbe a sok száz vagy ezer pixel négyzetes hiszterézisgörbéjének az eredője. Egy pixelen elvégzett mérés eredményeképpen kapott hiszterézisgörbét mutat a 3. ábra bal felső sarkában látható kisebb ábra.

A Preisach-modell

A mágneses anyagok hiszterézistulajdonságait leíró modellek jelentős része a Preisach-modellen alapul, mivel ennek segítségével sikeresen modellezhetők azok a mágneses anyagok, amelyeket a mindennapi gyakorlatban, például az adattárolásban is sűrűn alkalmaznak. A modell kidolgozása *Preisach Ferenc* nevéhez fűződik [1]. A modell az anyagot aszimmetrikus, elemi, négyzetes hiszterézishurkokkal bíró részecskék eloszlásával írja le, és a mágnesezettséget az eloszlási függvénynek a megfelelő területre történő integrálásával számítja ki. A modellt eredetileg mágneses anyagokra alkalmazták, de az elv nagyon általános. A modell feltételezései azonban nem teljesülnek a valódi fizikai rendszerek túlnyomó többsége esetén, így igen nehéz az elméleti következtetéseket a tényleges anyagi paraméterekkel összevetni. Ez akadályokat gördít a modell további finomítása elé is. Ezért alapvető jelentősége van egy olyan modellanyagnak, és az ezen történő megfelelő méréseknek, ami lehetővé teszi a fenti probléma megoldását.

A fentiekben bemutatott modellanyag és az erre a célra kifejlesztett mérőberendezés – az irodalomban egyedülálló módon – kiválóan alkalmas a Preisach-modell kísérleti adatokkal való közvetlen egybevetésére. Hiszen itt pontosan az történik, amit a klasszikus modell feltételez, nevezetesen, hogy az anyag makroszkopikus hiszterézisgörbéje elemi négyzetes hiszterézisgörbék (hiszteronok) sokaságából épül fel, a mágnesezettség átfordulása csak forgással történik és nincs reverzibilis mágnesezettség. Ráadásul az elemi hiszteronok viselkedése közvetlenül is mérhető, kölcsönhatásuk, kapcsolási terük, minden paraméterük egyenként is meghatározható. Meg lehet határozni a Preisach-paraméterek (kölcsönhatási tér, eloszlási függvény) változását a részecskék közötti mágneses kölcsönhatás változtatásával, amely megtehető a hőmérséklet változtatásával, vagy pedig külső mágneses tér alkalmazásával.

Az alábbiakban, mintegy a módszer és a lehetőségek illusztrálására, bemutatjuk, hogyan lehet a teljes hiszterézisgörbét meghatározni az egyedi pixelek kapcsolási tulajdonságainak figyelembe vételével.

A teljes hiszterézisgörbe rekonstrukciója az egyedi pixelek kapcsolási tulajdonságai alapján

Kidolgoztunk egy numerikus modellt [2], amelynek segítségével három különböző pixelcsoportra rekonstruáltuk a teljes hiszterézisgörbét. A mérések és a szimuláció 5×5 , 7×7 , valamint 9×9 elemet tartalmazó csoport esetére vonatkoznak. A H_{app} külső mágneses tér és a mágnesezettség a minta felületére merőleges irányú (a könnyű tengely a z irány). A pixelek közötti kölcsönhatás magnetosztatikus. A pixelekre ható effektív mágneses tér függ a szomszédos pixelek mágneses állapotától. Feltételezve, hogy a külső mágneses tér a $+z$ irányba mutat, mindegyik $+M$ mágnesezettséggel bíró szomszéd az effektív belső mágneses teret (H_{in}) $-M$ értékkel csökkenti. A nem elliptikus alaknak köszönhetően a belső tér nem homogén [3] még akkor sem, ha $H_{app} \geq 4\pi M_s$. Valamely (i_0, j_0) pixelre bármelyik más (i, j) pixelről ható $D(|i-i_0|, |j-j_0|)$ kölcsönhatási tenzorelemek véges differenciászámítással, a felületi integrálok kiszámításával, vagy a dipólusközelítéssel határozhatók meg. Az effektív kölcsönhatási tér az (i_0, j_0) pontban lévő pixelre az összes többi pixel hatását figyelembe véve:

$$H_i(i_0, j_0) = 4\pi M_s \sum_{i,j} \Lambda D(|i-i_0|, |j-j_0|), \quad (1)$$

ahol $\Lambda = \pm 1$, attól függően, hogy M iránya milyen. A valamely pixelre ható belső teret az alábbi kifejezés alapján lehet kiszámítani:

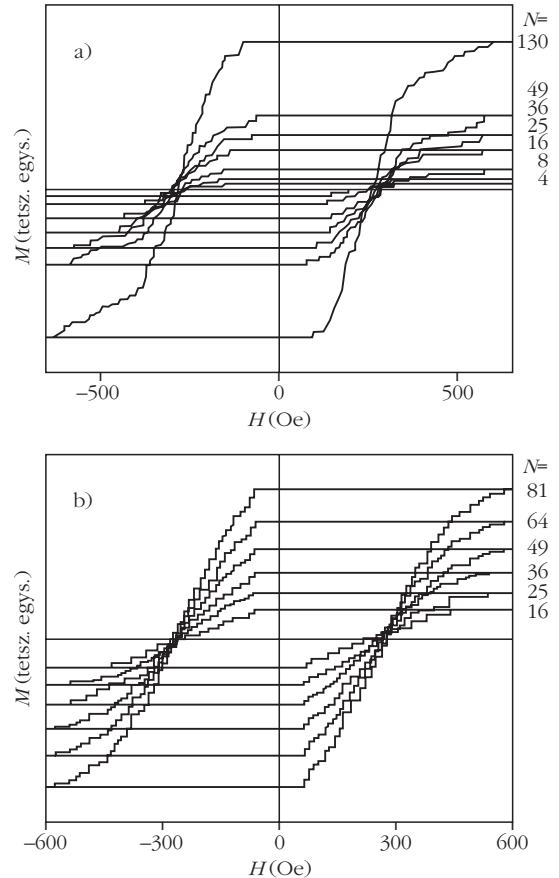
$$\begin{aligned} H_{in}(i_0, j_0) &= H_{app} - H_i(i_0, j_0) = \\ &= H_{app} - 4\pi M_s \sum_{i,j} \Lambda D(|i-i_0|, |j-j_0|). \end{aligned} \quad (2)$$

Ha már van egy olyan pixel, amelynek a mágneses állapota megváltozott, akkor a mágnesezettség és a kölcsönhatási tér eloszlása is változik. A (2) egyenletből következik, hogy ebben az esetben a belső tér eloszlása is megváltozik, és az új $H'_{in}(i_0, j_0)$ belső tér, amely mindegyik egyedi pixelre hat, az alábbi kifejezés alapján számítható ki:

$$\begin{aligned} H'_{in}(i_0, j_0) &= \\ &= H_{in}(i_0, j_0) + 8\pi M_s D(|i_0-i_s+1|, |j_0-j_s+1|), \end{aligned} \quad (3)$$

ahol (i_s, j_s) azon pixelek helyzete, amelyek éppen mágneses állapotot váltottak.

A koercitivitás $H_c(i_0, j_0)$ eloszlásának meghatározása kétféleképpen lehetséges. Az egyedi pixelek kapcsolási terének mérésére alapozva megállapítható, hogy a rendszer koercitivitása Gauss-eloszlást követ, amelynek a középértéke és félértékszélessége adott. A koercitivitásértékek generálhatók ebből a két adatból, amelyeket a véletlenszerű eloszlással rendelkező egyedi pixelek határoznak meg. Vagy, a H_{app} külső teret numerikusan változtatva a negatív és pozitív telítési értékek között a mágnesezési görbe, vagyis $M(H_{app})$ rekonstruálható az egyedi mágneses



4. ábra. Különböző méretű pixelcsoportok hiszterézisgörbéje. a) mért, b) számolt görbék.

átfordulások sorozata alapján. A mért teljes hiszterézisgörbe látható a 4.a ábrán, ahol különböző méretű pixel csoportok (4, 9, 16, 25, 36, 49, 130) esetén vannak ábrázolva a telítéstől-telítésig mért hiszterézisgörbék.

A számolás eredménye pedig, ahol a mért elrendezésnek megfelelő csoportokra számoltunk, a 4.b ábrán szerepel. Igen jó egyezést tapasztaltunk a mért és számított görbék között. A számolás alapjául az egyedi pixeleken mért kapcsolásitér-értékek szolgáltak. Minden pixelt a mért H_c tere jellemez.

A vizsgált pixelcsoportok részét képezik a tényleges mintában lévő több ezer pixelnek. Vagyis nem tekinthetők elszigeteltnek, a kapcsolási terük függ az őket körülvevő többi pixel aktuális állapotától. Annak érdekében, hogy megvizsgáljuk a különbséget az elszigetelten álló pixelcsoport, illetve az ugyanolyan méretű, de a többi pixel tengerébe beágyazott pixelcsoport viselkedése között, egy 5×5 -ös pixelcsoportot választottunk ki, amelyet vagy elszigeteltnek, vagy pedig egy 9×9 -es csoport közepén állónak tekintünk. Méréseket és számolásokat végeztünk ezen a csoporton mindkét esetben. A 9×9 -es csoportban az összes pixel kölcsönhatását figyelembe vettük, amikor kiszámítottuk az 5×5 -ös csoport viselkedését. Az elszigetelt csoportra jellemző görbe kicsit meredekebb a többi pixel közé beágyazott eseténél, ami jól mutatja a határfeltételeket. Azonban, a [3]-as hivatko-

zásnak megfelelően, a 9×9-es csoportból származó kölcsönhatási tér csak 3%-kal módosítja a belső pixelek által érzékelt mágneses teret.

A kidolgozott modell és a szimuláció hatékony és megbízható módon használható a teljes hiszterézisgörbe rekonstrukciójára. Ezt bizonyítják a kapott értékek is: az 5×5 pixelt tartalmazó csoport esetén a mért, átlagos koercitív tér $H_{avg} = 234$ Oe, ami nagyon jól egyezik a szimulációval, az elszigetelt 5×5 esetre kapott $H_{isol} = 233$ Oe értékkel. Ugyanakkor a beágyazott esetben a görbeszimuláció $H_{emb} = 217$ Oe értéket eredményez, ami nagyon közel van a teljes görbén mérhető $H_c = 213$ Oe értékhez.

Megjegyzendő még, hogy a vizsgált mágneses rétegek nagyon nagy jósági tényezője, vagyis a lemágnesező térhez képesti igen nagy egytengelyű anizotropia a rendszert rendkívüli módon stabillá teszi a termikus fluktuációkkal szemben. Emiatt a termikus fluktuáció hatását, ami a pixelek kapcsolási terének fluktuációját okozná, nem vettük figyelembe a fentiekben tárgyalt eljárás során. Ez az oka, hogy a számított kapcsolási terek mindig ugyanazok ugyanarra a pixelcsoportra. Ugyanakkor a mérések azt mutatják, hogy az egyes pixelek kapcsolási terének magának is van szórása, továbbá a különböző pixelek kapcsolási terei meglehetősen tág tartományban változnak. Ez a jelenség a részecskék mikrostruktúrájában fennálló különbségekkel, valamint a bennük előforduló hibákkal magyarázható, amit szimulációval nem tudunk figyelembe venni. Viszont a teljes hiszterézisgörbén végzett mérések jól reprodukálják magukat, ami arra utal, hogy a teljes hiszterézisgörbe alakját az egyedi pixelek kapcsolási tereinek eloszlása határozza meg.

Összefoglalás

Mágneses gránátrétegben kialakított monodoménus rendszer esetén vizsgáltuk a részecskék kapcsolási tulajdonságait. Kidolgoztunk egy numerikus modellt, amelynek segítségével a teljes hiszterézisgörbe rekonstruálható az egyedi részecskéken végzett mérések adataiból, és kimutattuk, hogy ez a szimuláció jól egyezik a kísérleti eredményekkel. Ez az eredmény jól tükrözi a numerikus modellezés megbízhatóságát és hatékonyságát. Az egyik fő cél annak a minimális részecskeszámnak a meghatározása volt, amelyre az integrálást kiterjesztve az elméleti számítások a gyakorlati esetet már elfogadhatóan írják le. Ezáltal közvetlenül megmondható az, hogy az elméleti számításoknál milyen közelítést kell alkalmazni. A növekvő elemszámú pixeleken végzett szisztematikus mérések segítségével kimutattuk, hogy a makroszkopikus hiszterézisgörbe körülbelül 100 elemből álló rendszer esetén már nagyon jól közelíti a végtelen sok elemből álló rendszer hiszterézisét. Ugyanakkor a koercitív erő már sokkal kisebb elemszám esetén is beáll a végtelen sok elemmel jellemezhető értékre. Az egyedi részecskék kapcsolási terének eloszlása Gauss-görbével írható le, amelynek félértékszélessége megegyezik a teljes hiszterézisgörbe koercitív terével. A részecskék közötti kölcsönhatási tér a Lorentz-eloszlásnak felel meg, és a szórás erősen függ a mágnesezettségtől.

Irodalom

1. F. Preisach. *Zeitschrift für Physik* 94 (1935) 277.
2. G. Zheng, M. Pardavi-Horvath, G. Vértessy. *Journal of Applied Physics* 81 (1997) 5791.
3. Y.D. Yan, J. Della Torre. *Journal of Applied Physics* 67 (1990) 5370.

A CSATORNAHATÁS SZEREPE IONSUGARAS ANALITIKAI ÉS IONIMPLANTÁCIÓS KÍSÉRLETEKBEN

Zolnai Zsolt, N.Q. Khánh, Battistig Gábor
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A *Fizikai Szemle* korábbi számaiban már esett szó a több évtizedre visszanyúló gyorsítóépítési hagyományokról a KFKI csillebérci telephelyén, és a nemzetközi mércével mérve is számottevő ionimplantációs és ionsugaras anyagvizsgálati eredményekről. A „hőskort” a Rutherford-visszaszórásos technika (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) kvantitatív anyagvizsgálatra történő alkalmassá tétele [1] és az első RBS-spektrumszimulációs programok megszületése fémjelzi. Azóta a módszerrel és a rokon jelenségekkel kapcsolatos ismeretek, tudományos és technológiai kérdések köre jelentősen kiszélesedett, ma is inspiráló kihívásokat tartogatva a témához csatlakozó fiatalabb korosztály számára. Szó esett az ionimplan-

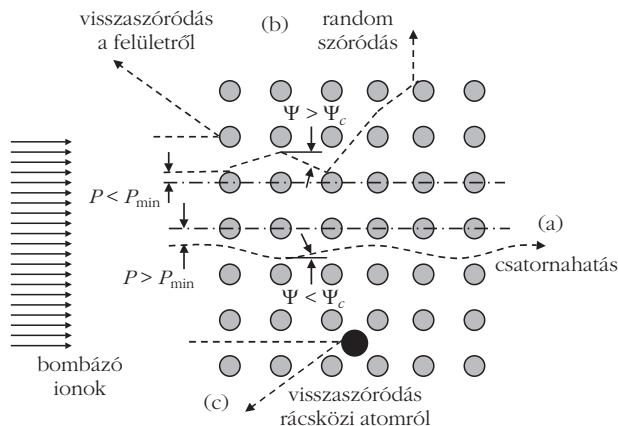
tációnak és az RBS-technikának az úttörő szerepéről a szilíciumtechnológiában elterjedt úgynevezett elő-amorfizálási eljárás [2] bevezetésében. A hazai ionsugaras analitikai kutatásokkal kapcsolatban tudomást szerezhettünk az RBS és az ellipszometria egymást hatékonyan kiegészítő alkalmazásairól [2], és az RBS-módszernek a porózus anyagok szerkezetének jellemzésében való sikerességéről [3]. Mindemellett a *Fizikai Szemle*ben kevésbé részletes tárgyalást kapott maga az RBS-technika, illetve ennek csatornahatással kombinált válfaja (RBS in combination with channeling, RBS/C), amelyet kristályos szilárdtestek vizsgálatkor standard eljárásként alkalmazunk. Jelen cikk célja a csatornahatás jelenségének rövid bemutatása,

majd annak az RBS/C anyagvizsgálatok és az ionimplantációs adalékolás során betöltött szerepéről lesz szó, amit néhány példával illusztrálunk.

Csatornahatással kombinált Rutherford-szórás

Az RBS/C-technikánál általában néhány MeV energiájú könnyű (p^+ , $^4\text{He}^+$) ionnyalábbal vizsgálunk rendezett atomi szerkezetű egykristályokat. A kristályrács irányított rendje módosítja a beérkező ionok pályáját az amorf (rendezetlen) anyagban történő mozgáshoz képest – ezt a jelenséget nevezzük csatornahatásnak. Az effektus fellépésére Stark már 1912-ben utalt, behatóbb vizsgálatokra azonban csak fél évszázad múlva került sor. A 60-as évek elején Robinson és Oen vette észre rézatomok rézkristályban történő mozgásának számítógépes szimulációja során, hogy ha a részecskék valamely alacsony indexű kristálytani tengely mentén haladnak, akkor a lefékeződésük lényegesen hosszabb útszakaszon történik. Másrészt, kristályos szilárdtest-részecskedetektorokban és vékony filmekben is megfigyelték, hogy a beérkező részecskék energiavesztesége nagymértékben függ a kristály orientációjától és a magas szimmetriával rendelkező irányokban jelentősen lecsökken. Ezekből a megfigyelésekből arra lehetett következtetni, hogy az atomi rendhez illeszkedő módon orientált kristályos anyag „átlátszóbb” a bombázó ionok számára, mint az orientálatlan.

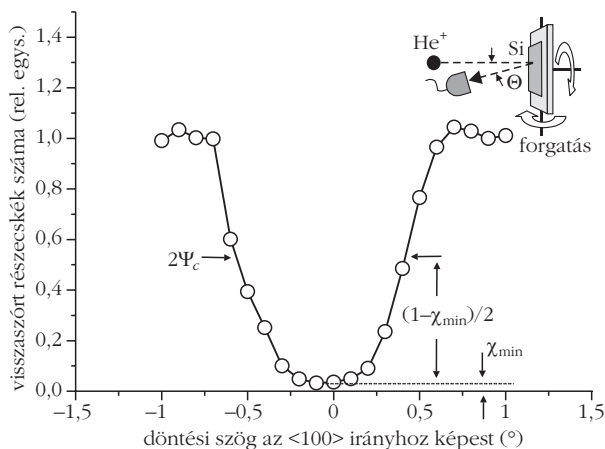
A csatornahatás (channeling) klasszikusan értelmezhető jelenség, melynek lényege, hogy a kristálytani tengellyel közel párhuzamosan érkező ion számára az atomsorok, illetve atomi síkok egy kontinuum potenciálfallal írhatók le. Ez a potenciálfal gyenge, elektronos ütközéseken keresztül az iont a szomszédos sorok – síkok – közötti térbe, a csatorna tengelyébe igyekszik fókuszálni. Így a csatorna falai közötti oszcilláló mozgás alakul ki, melynek hullámhossza jellemzően néhányszor 10 nm. Megkülönböztetünk axiális és planáris csatornahatást atomi sorok, illetve síkok esetén. Az axiális esetben a kölcsönhatások erősebbek, így az effektus is hangsúlyosabban jelentkezik. A továbbiakban csak az axiális csatornahatásról lesz szó. A csatornában haladó ionok pályája (1. ábra (a) eset) lényegesen eltér a véletlen (random) pályán haladó és a felületen vagy a tömbben nagyszögű szórást szenvedő ionokétól (1. ábra (b) esete). A mozgó részecskéket kormányzó kontinuumpotenciált tekinthetjük egy árnyékolt Coulomb-potenciálnak. Definálható egy minimális impakt paraméter, $P_{\min}$, amelynél ha közelebb megyünk egy atomsorhoz, a kontinuumpotenciál koncepció már nem érvényes. Az ion ekkor erősebb kölcsönhatásba kerül a csatornafallal és érzi a hőmozgás következtében kimozdult individuális atomokat is. Így megnő a valószínűsége a nagyobb szögű szórásnak, ami a csatorna elhagyásához (dechanneling) és a továbbiakban random fékeződéshez vezet. A $P_{\min}$ értéke összemérhető az árnyékolási hosszal és általában jól közelíthető a termikus rezgési amplitúdóval, amelynek



1. ábra. Kristályos szilárdtestbe belőtt ionok fékeződési útvonalainak különböző alapesetei.

nagyságrendje $0,1 \text{ \AA}$. Mivel a legintenzívebb rácsrezgések periódusideje $\sim 10^{-13} \text{ s}$, és egy 2 MeV energiájú He^+ ion egy rácsállandónyi távolságot $\sim 10^{-16} \text{ s}$ idő alatt tesz meg, így az ion valójában egy „befagyott” rácsot lát. Ekkor a termikus mozgást végző rácsatomok egyensúlyi helyzetből való kitérését, mint „statikus” állapotot leírhatjuk Gauss-eloszlással, ami – például a folyamat számítógépes szimulációjakor – megkönnyíti a kezelhetőséget.

Ha egy csatornázott ion az oszcilláló mozgás közben elegendően nagy tangenciális impulzusra tesz szert, azaz mozgásiránya elég nagy szöget zár be a csatorna falával, akkor a $P_{\min}$ távolságon belülre kerül és megtörténik a kiszóródás (1. ábra). A kiszóródáshoz tartozó határszög, a *kritikus szög* (Ψ_c) nagyságrendje $\sim 1^\circ$. A random pályán haladó ion mozgását már nem limitálja a kormányzó potenciál, így az atommagokkal való rugalmas ütközésekben, nagyszögű nukleáris szóródásokon keresztül is veszíthet energiájából (1. ábra). Ez a folyamat a jól ismert Rutherford-szórás, ekkor az ionok az atommagokat $10^{-5} \text{ \AA}$ távolságra is megközelítik. Világos, hogy a csatornázott ionok nem Rutherford-szórással fékeződnek, hiszen a potenciálfal nem engedi őket $P_{\min} \sim 0,1 \text{ \AA}$ távolságnál közelebb az atommagokhoz. A csatornából történő kiszóródás a hőmozgás mellett a belőtt ion és a rácsatomok elektronfelhői közötti Coulomb-kölcsönhatásból adódó rugalmatlan fékeződési folyamat is elősegíti. Míg az elektronos fékeződésben leadott energia elsősorban a rácsatomok ionizációjára és gerjesztésére fordítódik, addig a „biliárdszerű” nukleáris ütközések a rácsatomok visszalökődéséhez, esetenként a rácsból való kimozdításához, azaz rácshibák keltéséhez vezetnek. A fentiekből következik, hogy csatornairányban az ion több energiát veszít elektronos fékeződés útján, mint random fékeződés esetén, ahol viszont a céltárgy atommagjainak leadott energia mennyisége lesz nagyobb. A csatornahatás így csökkentheti a fékeződés során keletkező rácshibák számát. A fékeződési folyamatok különbözősége miatt a céltárgyban megállt ionok mélységi eloszlása is eltér, ezzel magyarázhatjuk a bevezetőben említett nagyobb behatolási mélységet a csatornahatás fennállása esetén.



2. ábra. A kritikus szög mérése 1,5 MeV energiájú He^+ -ionokra a Si $\langle 100 \rangle$ axiális tengelye mentén fellépő csatornahatás esetén a felület közeléből nagy szögben ($\Theta = 165^\circ$) visszaszóró He -részecskék detektálásával.

Térjünk most vissza a kiszóródáskor szerepet játszó kritikus szög meghatározásának kérdésére. A mintát akár $0,01^\circ$ pontossággal is orientálni tudjuk a csatornák irányába egy kéttengelyű goniométerhez csatlakozó mintatartón, ha a kristályt az ionnyalábhoz képest megfelelő pontossággal döntjük és forgatjuk (2. ábra). A kritikus szög meghatározása kísérletileg úgy történhet, hogy megmérjük a céltárgy vékony (~ 10 nm vastagságú) felületi rétegéből érkező, nagyszögű direkt visszaszóródást szenvedő ionok számát, miközben a kristálytani tengely irányát kis lépésekben változtatjuk a bombázó ionnyalábhoz képest. Egy hasonló kísérlet eredményét mutatja a 2. ábra, ahol a Si-egykristály $\langle 100 \rangle$ axiális csatornája körül végeztük el a mérést 1,5 MeV energiájú He^+ -ionokkal. A kritikus szöget az így kapott völgy félértékisélessége határozza meg, melynek nagysága jelen esetben $\sim 0,5^\circ$. A Ψ_c értéke elméleti modell alapján számítva $0,57^\circ$, amely jól egyezik a kísérlet eredményével.

Csatornahatás és ionimplantáció a mikroelektronikai technológiában

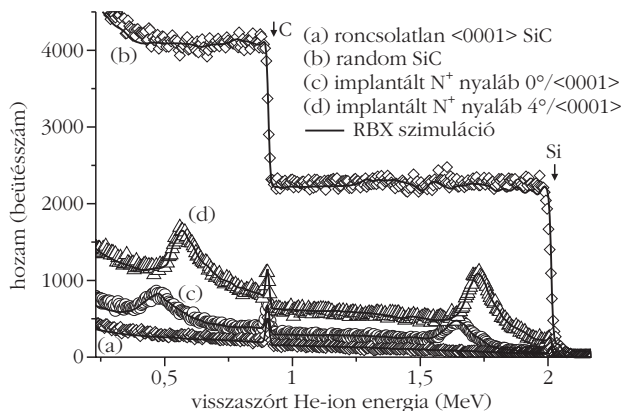
A gyakorlatban a mikroelektronikai eszközök előállításánál fontos a pontos tervezhetőség és a fizikai folyamatok megfelelő szintű kezelhetősége. Az itt alkalmazott egyik technológiai lépés az ionimplantáció, ahol 10–100 keV energiájú, elektromos térrel felgyorsított ionokat lövünk be az anyagba. Egyes Si-technológián alapuló eszközök előállításánál akár több tucatszor is használják az ionimplantációs eljárást – többek között a kívánt vezetési tulajdonságok eléréséhez szükséges adalékatomok (pl. bór, foszfor, arzén) félvezetőkristályba történő bejuttatásához. Mivel a csatornahatás nehezen reprodukálható, a Si-technológiában a kezdetektől fogva igyekeztek ezt az effektust elkerülni, és a jól kézben tartható random fékeződésre helyezni a hangsúlyt. Ezért vezették be *J.W. Mayer*, *Gyulai József* és munkatársaik az úgynevezett előamorfizálás eljárást [2], ahol először a szilíciumkristály

vékony felületi rétegét Si-ionok implantációjával elroncsoljuk, majd az így kapott amorf rétegbe, amely már nem tartalmaz csatornákat, egy második lépésben implantáljuk be az adalék ionokat. Ezután egy viszonylag alacsony hőmérsékletű hőkezeléssel az amorf réteget ismét visszakristályosítjuk.

Napjainkban, amikor a Si-technológia megközelítette teljesítőképessége határait, intenzív kutatás folyik a megfelelő alternatívát jelentő anyagok vizsgálata terén. A nagyteljesítményű, nagyfrekvenciás, optoelektronikai, illetve magas hőmérsékletű környezetben való alkalmazásoknál továbblépést jelenthet a széles tiltott sávú félvezetők (pl. gyémánt, gallium-nitrid, szilícium-karbid) színre lépése. A SiC tulajdonságaira nézve tekinthető a Si és a gyémánt rokon anyagának, amelynek szerkezete a gyémántrácséhoz hasonló, ennek köszönhetően rendkívül kemény és termikusan stabil anyag. A SiC-ban az adalékatomok diffúziója (pl. bór, nitrogén, foszfor) magas hőmérsékleten is igen lassú, ezért adalékolási eljárásaként csak az ionimplantáció jöhet szóba. Az implantációval amorfizált SiC csak magas hőmérsékleten tud visszakristályosodni és ekkor sem tökéletesen. Így az előamorfizálást itt nem alkalmazhatjuk, ehelyett az implantáció közben az amorfizáció elkerülésére, a kristályhibák számának minimalizálására kell törekednünk.

A csatornahatás tehát csökkenti a besugárzás által keltett kristályhibák számát, de a rácshiba-analízis mindenképpen fontos például a csatornairányú ionfékeződés pontosabb leírásának szempontjából is. Egy kísérletben olyan hatszöges kristályrácsú SiC-minták rácskárosodását vizsgáltuk, amelyeket előzőleg 500 keV energiájú N^+ -ionokkal a $\langle 0001 \rangle$ axiális csatorna (a hatfogású szimmetriatengely) irányából implantáltunk [5]. Az implantáció során jól kollimált N^+ -nyalábot használtunk, melynek divergenciája $\sim 0,1^\circ$ értéket vett fel. Mivel itt az axiális csatornából történő kiszóródás kritikus szöge a számítások szerint $\Psi_c = 1,7^\circ$, így a kis nyalábdivergencia lehetővé tette az implantáló nyaláb pontos orientálását. A különböző mértékű csatornahatás, vagyis a teljes és részleges csatornázás, valamint a random irányú besugárzás hatását úgy vizsgáltuk, hogy a minta felületére merőleges $\langle 0001 \rangle$ irányú tengelyt (csatornát) a jól kollimált N^+ -nyalábhoz képest 0° , $0,5^\circ$, $1,2^\circ$, $1,6^\circ$, illetve 4° szögértékekkel döntöttük.

Ha egy ionsugaras analitikai kísérletben a nagy szögben visszaszóró He -részecskéket nemcsak a mintafelület közeléből, de a mélyebben fekvő rétegekből is detektáljuk és energiájuk szerint szeparáljuk, akkor megkapjuk a minta visszaszórási spektrumát. Ezt láthatjuk a 3. ábrán, amely a roncsolatlan SiC-minta $\langle 0001 \rangle$ csatornázott (a), illetve random (b) visszaszórási spektrumait mutatja 3,5 MeV He^+ analízáló nyalábbal. Míg a $\langle 0001 \rangle$ spektrumot pontosan a csatornairánnyal párhuzamos, addig a randomot azzal 7° -os szöget bezáró nyalábbal vettük fel. A 7° döntési szög általában elegendő a csatornahatás minimalizálásához. A random spektrumhoz képest a csatornázott spektrumban a visszaszóró He -hozam a nukleáris ütközések kisebb valószínűsége miatt csaknem két nagyságrenddel kisebb.



3. ábra. 3,55 MeV energiájú He⁺-ionnyalábbal mért BS/C-spektrumok: (a) <0001> irányban orientált He-nyaláb csatornázott BS/C-spektruma roncsolatlan SiC-kristályon, (b) a <0001> irányhoz képest 7°-ban döntött He-nyaláb random BS-spektruma roncsolatlan SiC-kristályon. (c), (d): 500 keV N⁺-implantációval roncsolt SiC-kristály csatornázott He⁺ BS/C-spektrumai, ahol az implantáció (c) <0001> irányban orientált, illetve (d) a <0001> irányhoz képest 4°-ban döntött random irányú N⁺-nyalábbal történt.

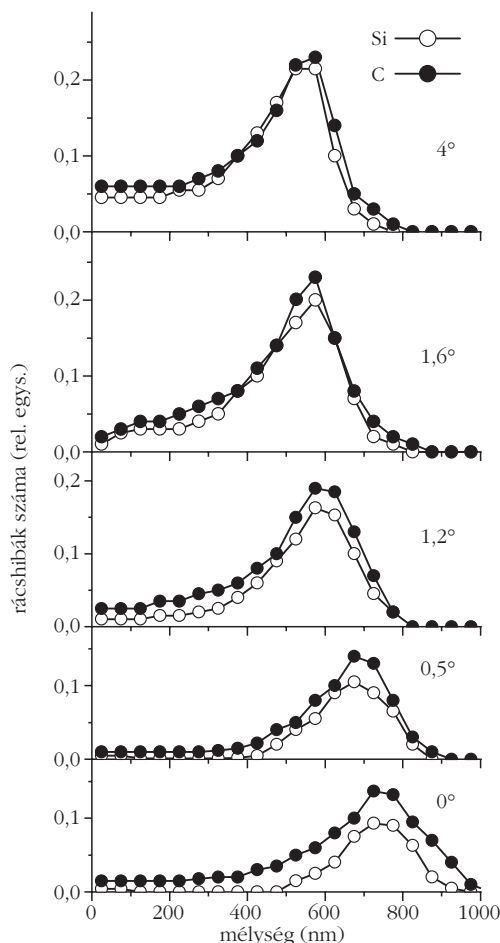
Ismerve a He-ionok fékeződését az anyagban az energiaskála mélységskálává transzformálható, így a módszer alkalmassá válik mélységi elemanalízisre és a kristályhibák mélységeloszlásának vizsgálatára. A felületi Si- és C-atomokról rugalmasan visszaszóródott He-ionok energiája különböző: Si esetén ~2 MeV, C esetén ~0,9 MeV. Így két különböző mélységskálát definiálhatunk a Si- és C-komponensekre.

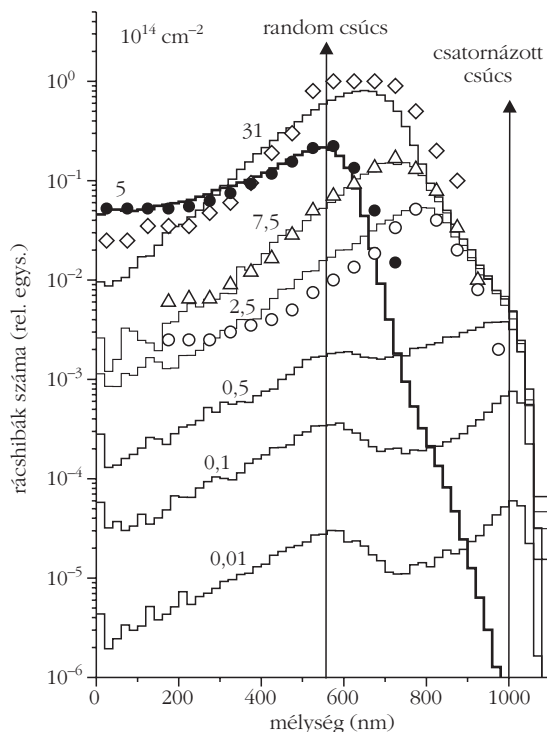
A jó mélységfelbontás mellett a módszer specialitását a 3,5 MeV He-energia környezetében fennálló magrezonancia adja. A He(C,C)He rugalmas nukleáris szórás hatáskeresztmetszete nem a Rutherford-képlettel kiszámítható érték (σ_R), hanem annak körülbelül hatszorosa, míg a He(Si,Si)He szórásnál továbbra is a Rutherford-féle értékkel számolhatunk. Így a hatáskeresztmetszetek közötti különbség kiegyenlítődik – mivel $\sigma_R(\text{Si})/\sigma_R(\text{C}) = (Z_{\text{Si}}/Z_{\text{C}})^2 = 5,4$ –, és a szén hozama hasonló lesz a szilíciuméhoz. A két komponens tehát közel azonos érzékenységgel és egyszerre vizsgálható.

A 3. ábrán a roncsolatlan minta már tárgyalt (a) és (b) spektrumai mellett a (c) és (d) spektrumok a 0° és 4° szögben azonos dózisu N⁺-implantáció által roncsolt SiC-minta csatornázott He⁺-visszaszórását mutatják. A roncsolatlan minták spektrumaitól eltérően a (c) spektrumban 0,5 és 1,6 MeV közelében, a (d) spektrumban pedig 0,6 és 1,75 MeV közelében új csúcsokat találtunk. Ezek a N⁺-implantáció által keltett kristályhibákból, azaz a rácsközi térbe került Si- és C-atomok hatásából erednek. A rácshibák visszaszórják a csatornában haladó analizáló He-ionokat, és gyengítik a rájuk kifejtett csatornahatást (1. ábra (c) esete). A csatornázott N⁺-implantáció nagyobb mélységben és lényegesen kisebb mértékben okoz rácskárosodást, mint a 4°-ban döntött, random irányú N⁺-implantáció. Ezt az mutatja, hogy a (c) spektrum csúcsai a (d)-hez képest alacsonyabb visszaszórt He-energiáknál jelennek meg. Mindez összhangban van a csatornaimplantáció közben lejátszódó, fentebb ismertetett folyamatokkal.

A 3. ábrán a folytonos vonalak egy elméleti modell alapján készült RBX nevű programmal [6] kiszámított spektrumokat mutatnak. Az RBX szimulációs modell segítségével megkaphatjuk az implantáció által keltett rácshibák mennyiségét a mélység függvényében. Ilyen RBX kiértékelés eredményét láthatjuk az 4. ábrán a Si- és C-alrácsra, különböző beesési szögek alatt történt, azonos dózisu N⁺ implantáció esetén. 0° alatti beesésnél erős a csatornahatás, a felső 300 nm-es tartományban keltett kristályhibák száma minimális. A N⁺-nyalábot 0,5° szögben döntve alig módosul az eloszlás. Ez várható is, hiszen ekkora eltérés jóval kisebb a kritikus szög értékénél. 1,2°-nál részleges csatornahatást figyelhetünk meg, a dechanneling a felülettől monoton nő, míg 1,6°-nál, a kritikus szöghöz közeli értéknél már a legfelső 100 nm-en – néhány oszcillációs periódus után – valamennyi csatornázott N⁺-ion kiszóródik, a hibaeloszlás alakja lényegében megegyezik a random irányú, 4°-ban döntött implantációnál megfigyelhetőével. A profilokból azt is láthatjuk, hogy minden esetben több C-atom lépett ki a rácsból, mint Si-atom. Ennek az az oka, hogy a kisebb rendszámú C-atommal kevesebb energiát kell

4. ábra. 500 keV energiájú N⁺-besugárzás által keltett Si- és C-rácshibaprofilok SiC-ban a N⁺-nyaláb és a <0001> kristálytani tengely által bezárt szög függvényében. Az implantáció minden esetben azonos dózissal történt ($5 \cdot 10^{14}$ N⁺ cm⁻²). A görbék a 4. ábrán bemutatott 3,55 MeV BS/C-spektrumok kiértékelésének eredményei.





5. ábra. 500 keV energiájú N^+ -besugárzás által keltett rácshibák mélységi eloszlása SiC-ban különböző implantált dózisokra $10^{14} N^+ cm^{-2}$ egységeiben. A besugárzás a $\langle 0001 \rangle$ csatornairányból történt. Folytonos vonallal a Crystal-TRIM szimulációs program eredményeit, szimbólumokkal a 3,5 MeV He^+ BS/C-mérésekből kiértékelte profilokat tüntettük fel. A vastag vonal a random irányból, azaz a csatornához képest 4° -ban döntött N^+ -nyalábbal történt implantációhoz tartozik.

közölnünk annak rácsközi térbe juttatásához, mint egy Si-atommal. A csatornázott implantációkor keletkező rácshibaprofil nemcsak a pontos orientációra érzékeny, de az iondózistól is igen erősen függ. Ezt ábráztuk a 5. ábrán a fenti példára. A görbéket a Crystal-TRIM [7] szimulációs programmal kaptuk. Két csúcst láthatunk 550 nm és 1000 nm mélységben. A bombázó N^+ -ionok pozíciója az implantált felületen belül véletlenszerűen oszlik el, így egy részük a felülethez érkezve $P < P_{min}$ távolságra közelíti meg a legközelebbi atomot. Ezek az ionok már a felülettől random trajektóriákat követnek a csatornairányú belövés ellenére. Az általuk keltett rácshiba-eloszlás csúcsa látható 550 nm mélységben. Ennek pozíciója meg egyezik a vastag vonallal feltüntetett 4° -ban döntött random implantációnál megfigyelhető csúcsával. Az 1000 nm-nél lévő csúcs a felületnél becsatornázódó, $P > P_{min}$ impakt paraméterrel érkező ionok által keltett rácshibákhoz tartozik.

A Crystal-TRIM szimuláció szerint kis dózisok tartományában a rácshibák száma kezdetben lineárisan függ az implantáló dózistól, azonban a rácshiba-koncentráció küszöbértéke (esetünkben az amorf állapotnak megfelelő koncentráció kb. 1%-a) fölött a rácshibaprofil erősen torzulni kezd. Egy közbenső csúcs jelenik meg, amely fokozatosan a random csúcs pozíciója felé tolódik. A dózis növelésével ugyanis egyre több rácscsomó kerül a csatornába újabb szórócentrumokat képezve, amelyek újra és újra random pályára kén-

yszerítik a csatornázott ionok egy részét. Az 5. ábrán a BS/C-mérésekből kiértékelte rácshibaprofilokat is feltüntettük, amelyek jó egyezést mutatnak a Crystal-TRIM eredményekkel. Megjegyezzük, hogy a BS/C kísérleti módszer mérési adataiból kiértékelhető profilok érzékenységi határa 1% körüli. Ennél kisebb rácshiba-koncentrációról mérési adatok nincsenek, az elérhető tartományban azonban az 5. ábra mért és számított koncentráció értékei jó egyezést mutatnak. A szimuláció szerint a lineáris dózistartományban lesz a legnagyobb a csatornahatás rácshiba-csökkentő hatása. Itt, az összes rácshibát tekintve, a csatornázott/random arány körülbelül 1/7, míg a kísérletileg ellenőrizhető tartományban 1/4–1/2 közötti érték. Összességében azt mondhatjuk, a csatornahatás a $\sim 10^{13} N^+ cm^{-2}$ és ez alatti dózisoknál a leghatékonyabb, de még az amorfizációt (100% rácshiba-koncentrációt) okozó dózisok közelében is jelentős szerepet játszik.

Végezetül a csatornairányú implantációnak az ionos szintézisben játszott szerepéről ejtünk néhány szót. Az ionos szintézis során implantált nagy dózisok lehetővé teszik a céltárgy és a bombázó ionok által alkotott kémiai vegyületek képződését. Egy példa erre a ritkaföldfémek (pl. Er, Yb, Gd, Dy) implantációja Si-egy kristályba. Az erbium szilíciummal alkotott vegyülete ígéretes elektromos és mágneses tulajdonságokkal rendelkezik, kompatibilis a Si-technológiával, és jól alkalmazható például kis ellenállású kontaktusrétegeként különféle mikroelektronikai eszközökben. Ugyanakkor probléma a jó minőségű erbium-szilicid réteg előállítása. Wu és társai random irányú implantáción alapuló ionos szintézissel próbálkoztak, de így nem tudtak jó minőségű, összefüggő réteget előállítani [8]. Viszont, amikor csatornaimplantációval lőttek be Er^+ -ionokat $450^\circ C$ hőmérsékleten a Si-egy kristályba az $\langle 111 \rangle$ irányból, akkor – több lépéses utóhőkezelés hatására – a Si-szubsztráthoz jól illeszkedő, jó minőségű, összefüggő, hexagonális szerkezetű epitaxiális $ErSi_{1.7}$ réteget kaptak. RBS/C-módszerrel részletesen vizsgálták a kialakuló $ErSi_{1.7} \langle 0001 \rangle$ || Si $\langle 111 \rangle$ rendszer kristályszerkezetét, illetve az Er- és Si-atomok rácslokalizációját. A fenti eset látványos példa a csatornahatás gyakorlati jelentőségére az anyagtudományi kutatásokban.

A cikkben érintett témák segítségével talán sikerült rávilágítani a csatornahatás nyújtotta előnyök anyagtudományi jelentőségére, és arra, hogyan lehet segítségünkre a csatornaimplantáció a kristályos szilárdtestekben történő ionfékeződés részleteinek jobb megértésében, a térben átfedő ionpályák közötti kölcsönhatások vizsgálatában. Mindemellett a csatornahatással kapcsolatos jelenségek mélyebb megértése az RBS és rokon technikákkal nyerhető információ kvantitatív kiértékelésénél is fontos tényező.

Irodalom

1. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodriguez: Analysis of silicon nitride layers on silicon by backscattering and channeling effect measurements. *Applied Physics Letters* 16 (1970) 232.
2. Gyulai J.: Részecskegyorsítótól a nanotechnológiáig. *Fizika Szemle* 53/2 (2003) 54.

3. Szilágyi E., Manuaba A., Pászti F., Battistig G., Hajnal Z.: Porózus anyagok vizsgálata ionsugaras módszerekkel. *Fizikai Szemle* 49/4 (1999) 121.
4. Z. Zolnai, N.T. Son, C. Hallin, E. Janzén: Annealing behavior of the carbon vacancy in electron-irradiated 4H-SiC. *Journal of Applied Physics* 96 (2004) 2406.
5. Z. Zolnai, A. Ster, N.Q. Khánh, E. Kótai, M. Posselt, G. Battistig, T. Lohner, J. Gyulai: Damage accumulation in nitrogen implanted 6H-SiC: Dependence on the direction of ion incidence and on the ion fluence. *Journal of Applied Physics* 101 (2007) 023502.
6. E. Kótai: Computer methods for analysis and simulation of RBS and ERDA spectra. *Nuclear Instruments and Methods B85* (1994) 588.
7. M. Posselt: Crystal-TRIM and its application to investigations on channeling effects during ion implantation. *Radiation Effects and Defects in Solids* 130–131 (1994) 87.
8. M.F. Wu, A. Vantomme, J. De Wachter, S. Degroote, H. Pattyn, G. Langouche, H. Bender: Comprehensive Rutherford backscattering and channeling study of ion-beam-synthesized ErSi_{1.7} layers. *Journal of Applied Physics* 79 (1996) 6920.

AZ ELLIPSZOMETRIA ALKALMAZÁSA FÉLVEZETŐ-FIZIKAI KUTATÁSOKBAN

Lohner Tivadar, Gergely György, Petrik Péter, Fried Miklós
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A félvezető-fizikában és -technológiában, valamint a mikroelektronikában és a hozzájuk kapcsolódó anyagtudományi kutatásokban egyre fontosabbá válnak a *felületközeli, roncsolásmentes, in situ* vizsgálatot lehetővé tevő mérési eljárások. Az ellipszometria (ELL) olyan optikai módszer, amely a fenti követelmények teljesítésén túl még pontos, gyors és olcsó is, és nem igényel különösebb mintaelőkészítést.

Az ELL az a mérési módszer, amellyel a mintára beeső monokromatikus fény visszaverődés utáni polarizációs állapotváltozását mérhetjük meg [1, 2]. Az 1. ábra egy fénynyaláb két közeg határfelületén bekövetkező visszaverődését és törését mutatja. A beeső és a visszavert fénynyaláb elektromos térerősségvektorát a beesési síkkal párhuzamos (p) és a beesési síkra merőleges (s , a német senkrecht szóból) komponensekre bontjuk. A kísérletekben az egyszerűség kedvéért lineárisan poláros beeső nyalábot alkalmaznak, és ekkor a reflektált nyaláb elektromos térerősségvektorának komponensei által leírt polarizációs ellipsziszben a nagytengely és a kistengely aránya $\tan \Psi$, az azimutszöge pedig Δ . A reflexió során a polarizációs állapot megváltozását a $\rho = (\tan \Psi) \exp(i\Delta)$ komplex reflexiós arány fejezi ki.

A tömbi anyag reflexiója egyetlen határfelülettel leírható. A komplex reflexiós arány azonban felületi vékonyréteg-szerkezetek esetén nem ilyen egyszerű, mivel a behatoló refraktált nyalábnak a mélyebb ha-

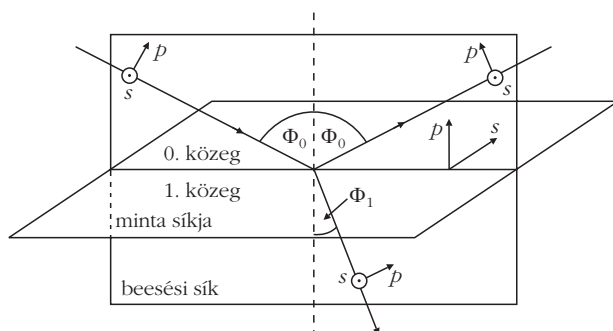
tárfelületekről való visszaverődését is figyelembe kell venni. Ha a tömbi anyagon egy – vagy spontán módon kialakult (pl. oxid), vagy valamilyen módszerrel leválasztott – vékonyréteg van, ekkor a 2. ábrán látható közeg–vékonyréteg–szubsztrát rendszer optikai modelljét alkalmazzuk.

Látjuk az ábrán, hogy a visszaverődő fénynyaláb rész hullámokból tevődik össze, egy végtelen sor összegzésével kapjuk meg a beesési síkkal párhuzamos és az arra merőleges komponensekre az úgynevezett totális amplitúdó-reflexióképességeket. Több felületi réteg esetében a modellnek számításba kell vennie a sokszoros törések és visszaverődések hatását.

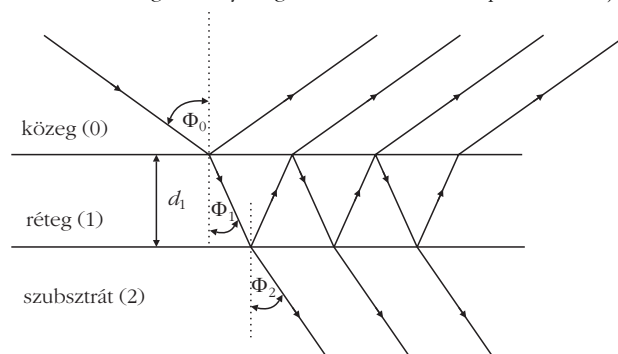
Az ELL fő előnye az, hogy az optikai komplex mennyiségek reális és képzetes részét (a törésmutatót és a fényelnyelést leíró extinkciós együtthatót) egyszerre, egy mérésből kapjuk meg, még egyhullámhosszas mérések esetén is, ellentétben más optikai módszerekkel (pl. reflexiómérés vagy interferenciámérés).

Az interferometriában azt hasonlítják össze, hogy két fénypár különbsége mekkora. Az ELL csak 2π -nél kisebb fázisváltozást tud kimutatni, de a minimális mért változás $2\pi/1000$, még egyszerű filmpolarizátorok esetén is (ez tízednanométer pontosságot jelent egykristályos szilíciumon létrehozott vékony SiO₂-réteg vastagságának meghatározása esetén)! A beeső

1. ábra. Fénynyaláb visszaverődése és törése két közeg határfelületén.



2. ábra. A közeg–vékonyréteg–szubsztrát rendszer optikai modellje.



fény ellipticitásának paramétereit a feladathoz lehet optimalizálni, így nagyon vékony rétegek, vagy kis változások is mérhetők.

Az ellipszometria elnevezés abból ered, hogy a lineárisan poláros fény ferde visszaverődés után általános esetben elliptikusan poláros lesz. Az ELL széles körben viszonylag későn terjedt el. Ennek az az oka, hogy a minta fizikai tulajdonságai indirekt módon, a mért komplex reflexiók együtthatóiból az esetek többségében komplex, nemlineáris egyenletrendszerek megoldásával határozhatók meg. Ezért a mérések rutinszerű végrehajtásának és kiértékelésének feltétele a számítási kapacitás olcsóvá válása volt, amit a személyi számítógépek elterjedése rendkívüli mértékben segített.

Az előzmények

Hazánkban az ellipszometriai (ELL) kutatások 1965-re nyúlnak vissza. Az MFKI és a Távközlési Kutató Intézet úpester laboratóriuma (TKI2) széles körű együttműködést folytatott. Ellipszométeres mérések igényével a Tungsram Félvezető főosztálya (*Giber János*) fordult a TKI2-ben *Gergely György*hez, aki az MFKI-ban is dolgozott. *Ádám János* (TKI2) már 1965-ben elkészítette *Ellipszometria* tanulmányát, továbbá egy ellipszométer megépítésének részletes terveit. A TKI2 1966-ban saját műhelyében megépítette az első hazai ellipszométert. A polarizációs optikai elemeket az NSZK-ból tudta csak beszerezni, az összes többi alkatrész hazánkban készült, részben a MOM (teodolitalkatrészek), részben a Hajógyár (hordozó lemez) közreműködésével. A fényforrás nagy nyomású higanylámpa volt, az fő Hg-vonalak számára interferencia-szűrőkkel (Carl Zeiss Jena). 1967-ben a TKI2-ben megkezdődtek a Si MOS-tranzisztorok oxidrétegének mérései.

Az MFKI-ban *Szigeti György* igazgató jóváhagyta egy korszerű ellipszométer beszerzését a Gaertner (USA) cégtől, melyet 1968-ban helyeztünk üzembe. A fényforrás itt is nagy nyomású Hg-lámpa volt interferencia-szűrőkkel, továbbá HeNe-lézer. Az ellipszométer kalibrációját *Forgács Gábor* végezte el [3] új eljárásával. *Dao van Phouc* aspiráns (Vietnam) kandidátusi értekezésében a Gaertner-ellipszométerrel SiO₂/Si-rétegek ELL-méréseivel foglalkozott.

A SiO₂/Si-rendszer ellipszométeres vizsgálatai

Az ELL mérésekből származtatják a ψ és Δ értékeket. A Δ a felületi (oxid-) réteg vastagságára jellemző. Az ELL-mérésekből meghatározható az oxid törésmutatója és tömörsége, továbbá a hordozó optikai állandói is. A Si MOS- és MIS-technológia elsősorban a felületi oxid- (vagy egyéb szigetelő) réteg vastagságát igényli, ezt ELL segítségével ellenőrzi és szabályozza. A legnagyobb kihívást az ELL-mérések kiértékelése jelentette. A Fresnel-képletekhez mestergörbákat és táblázatokat

készítettünk. 1969-ben hazánkban csak két nagy számítógép állott rendelkezésre. Az MFKI-TKI2 együttműködés keretében *Szűcs Bertalan* a TKI2 munkatársa a Statisztikai Hivatal számítógépével készítette el a psi-delta számításokat a SiO₂/Si-rendszerre a 254, 313, 334, 365, 404,6, 435,8, 546 nm hullámhosszú intenzív Hg-vonalakra, továbbá a 632,8 nm hullámhosszú HeNe-lézer vonalra. A táblázatok a 0–800 nm oxidvastagság-tartományt fogták át. Szigeti akadémikus javaslatára az *Ellipsometric tables of the Si-SiO₂ system for mercury and HeNe laser spectral lines* könyvet az Akadémiai Kiadó 1971-ben megjelentette [4]. Ezt a könyvet használta a teljes hazai félvezető-kutatás (MFKI, HIKI), -fejlesztés (TKI, Tungsram, MEV) és -gyártás (Tungsram) több mint 10 esztendőn át. A könyvnek nemzetközi visszhangja volt, számos hivatkozással.

ELL-mérések az MFKI félvezető-technológiában

1970 után az MFKI Gaertner-ellipszométerét a félvezető-technológia használta Si MOS, MIS, GaAs, szilícium-nitrid és szilícium-oxinitrid rétegek vizsgálatánál. A továbbiakban csak olyan munkákról szólnunk, melyekről közlemény jelent meg. 1987 óta az ELL-kutatásokat az MFKI már az ATKI-val együttműködve folytatta.

Közös munkánk volt a Tungsram Kutatóval az ATKI-ban implantációval amorfizált Si felületi rétegek optikai állandóinak meghatározása. A mintákat az MFKI Gaertner-ellipszométerével *Somogyi Mária* vizsgálta (546 nm), valamint Ádám János öt Hg-vonalnál. Több beesési szögnél történt mérés. A kiértékelést az ATKI-ban *Fried Miklós* és munkatársai végezték. Az n és k optikai állandók különböztek a kristályos Si-tól és függtek az előállítási paramétereiktől [5].

Ezután az MFKI főleg a III–V félvezetőknél alkalmazta az ellipszometriát. Eredményesek voltak a GaP felületi oxidrétegének ELL-vizsgálatai a Gaertner-ellipszométerrel. A kiértékelésnél *Bíró Sándor* (TKI2) FORT-RAN-programját alkalmazták. Fő cél az oxidréteg vastagságának meghatározása volt, de az ELL egyéb információkat is nyújtott. Az ATKI-ban végezték az RBS-vizsgálatokat az oxidrétegeken [6, 7]. Az elektrondiffrakciós vizsgálatokat *Farkasné Jahnke Mária* végezte az MFKI JEOL elektronmikroszkópjával [7].

Az ELL alkalmazása az MFKI–Clermont-Ferrand Egyetem együttműködésében, az ATKI közreműködésével

Az MFKI-ban *B. Gruzza*val 1979 óta dolgoztunk együtt. Itt két témáról szólnunk.

B. Gruzza fő kutatási témája az InP félvezető. Az InP-technológiai kutatásokban készített Al₂O₃ vékonyrétegeket InP felületén, MIS célokra. Az oxidot Knudsen-cellából, grafittegelyből párologtatta, azt elektronsbombázással fűtötte. A rétegszerkezet hőkezelésével

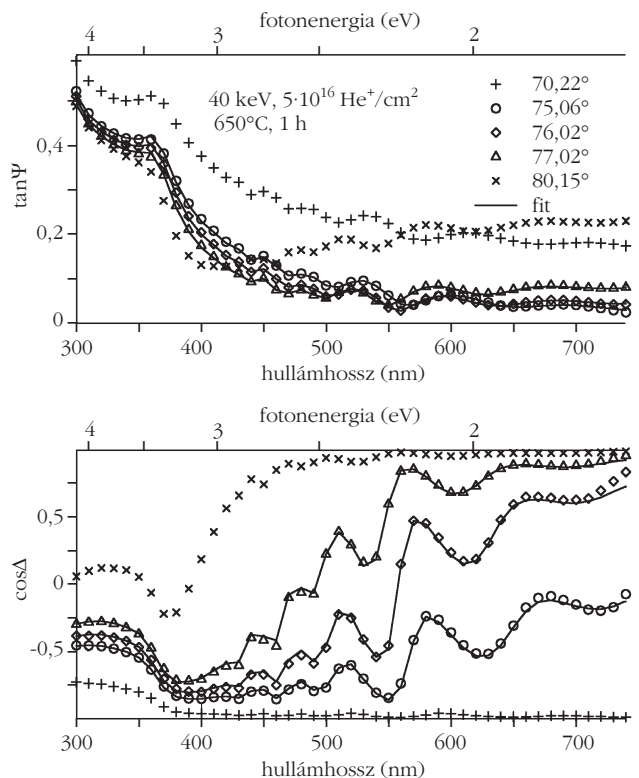
az InP felületén InSb-réteg képződik. A technológia számára nagyfotosságú az Al_2O_3 réteg vastagságának mérése. Erre a célra automata ellipszométer állott rendelkezésre a Clermont-Ferrand-i Egyetemen. HeNe-fényforrást alkalmaztak. A rétegfelvitel kalibrálását $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ ELL-mérésekkel végezték. ELL-méréseket végeztek $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InP}$ továbbá $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InSb}/\text{InP}$ (InSb 1 és 2 nm vastag) rendszerekkel. A kiértékeléshez a mestergörbékét *Lohner Tivadar* és *Fried Miklós* készítették, az eredményekből közös publikáció született. Az $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ optikai állandóival *Bodó Zsolt*, *Barna Péter*, *Ádám János* és *P. Croce* (Inst. Optique, Orsay)-val közös kutatásainkban foglalkoztunk, ezekről *Gergely György* összefoglalót közölt a *Fizikai Szemle*-ben (1990/11, 335. és 2006/2, 65).

Intenzív, széleskörű együttműködést folytattunk B. Gruzával a PSL (porózus Si) területén is. A PSL mintákat *Vázsonyi Éva* készítette az ATKI-ban. Az ELL-mérések Clermont-Ferrand-ban készültek az automatikus ellipszométerrel. *Fried Miklós* és munkatársai már 1994–96-ban kidolgozták a PSL ellipszométeres modelljét és a spektrumok kiértékelését. Az eljárást átvette a francia egyetem. Az ELL kísérleti eredményeket *Lohner Tivadar* értékelte ki, az eredményeket közösen publikáltuk [8].

Ionimplantált szilícium vizsgálata ellipszometriával Csillebércen

Az ionimplantációs kutatások során észleltük, hogy bizonyos implantációs feltételek mellett szemlátomást különbség mutatkozott az implantált és az implantálatlan szilícium színe között. Ekkor adódott a gondolat, hogy érdemes lenne megvizsgálni ezeket a mintákat ellipszometriával is, és kapcsolatot keresni az ionimplantációs művelet paraméterei (ion, energia, dózis) és az ionimplantáció által előidézett optikai változás között. Az első kísérletben szilíciumionokkal bombázott szilíciumot vizsgáltunk, azaz önimplantációt alkalmaztunk, hogy az esetleges kémiai hatást elkerüljük. Az ionimplantáció által okozott rácsrendezetlenséget csatornahatással kombinált Rutherford-visszaszórással vizsgáltuk. Rövidesen a technológiában használatos foszforionok implantálásával folytattuk a munkát, amelynek eredményeit az első KFKI-ban megírt ELL-témájú folyóiratcikkben tettük közzé [9].

Vizsgálataink közül a hélium-ionokkal implantált szilícium spektro-ellipszometriai vizsgálata során elért eredményeket mutatjuk be röviden. A kísérletek francia kutatók kezdeményezésére indultak. Nagydózisú He-implantáció hatására He-buborékok alakulnak ki a szilícium-egy kristályban, ami getterezésre, töltéshordozók élettartamának beállítására és szilícium-szigetelőn szerkezetek létrehozására alkalmas [10]. A He-buborékok mélységbeli eloszlását hagyományosan transzmissziós elektronmikroszkópiával vizsgálták, de a buborékok és az egy kristályos szilícium között a látható és közeli infravörös hullámhossztartományban

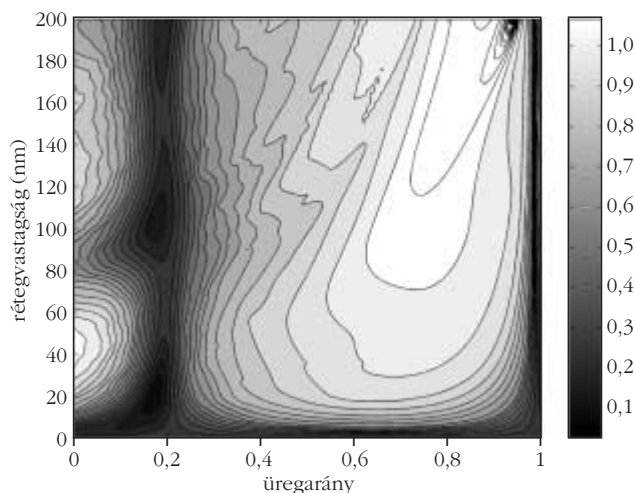


3. ábra. Mért (szimbólumok) és illesztett (folytonos vonal) ellipszometriai spektrumok nagydózisú He-ionokkal implantált és hőkezelt szilíciumon.

meglévő nagy törésmutató-kontraszt miatt spektroszkópiai ellipszometriával is nagy pontossággal, gyorsan és roncsolásmentesen vizsgálható a minta mélységbeli szerkezete. A He-buborékok mélységbeli eloszlását üregprofilal írjuk le.

Az ellipszometriai spektrumok, azaz a beesési síkkal párhuzamos és arra merőleges komplex reflexiók együtthatók hányadosának abszolút értéke ($\text{tg}\Psi$) és fázisa ($\text{cos}\Delta$) ma már nagy pontossággal, rutinszerűen mérhetők kereskedelmi forgalomban megvásárolható ellipszométerekkel. A nehézséget a mért spektrumok értelmezése jelenti, amihez megfelelő optikai modellt kell konstruálni, és a számolt spektrumokat a modellparaméterek változtatásával a mért spektrumokra illeszteni. A 3. ábra a 40 keV energiájú, $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ dózisú He-ionok egy kristályos szilíciumba implantálása, majd 650 °C-on 1 óráig N_2 -atmoszférában történt hőkezelése nyomán kialakult üregprofilról több beesési szögnél mért ellipszometriai spektrumokat mutatja. Fontos megemlíteni, hogy a 40 keV energiájú He-ionok hatótávolsága szilíciumban körülbelül 350 nm, a 650 °C-on 1 óra hosszát végzett hőkezelés során pedig az ionimplantáció által keltett rács sérülések nagy része kihőkezelődik.

Bár a mért spektrumokból a gyakorlott szem már le tud vonni bizonyos következtetéseket, a minta paramétereinek pontos meghatározása csak számítógépes szimulációval lehetséges. A $\text{cos}\Delta$ -ban a 450 nm hullámhossz fölött a 75–77°-os beesési szögek esetén megjelenő interferencia-oszcillációk azt mutatják, hogy az üregprofil (kb. 200–400 nm mélységértékek



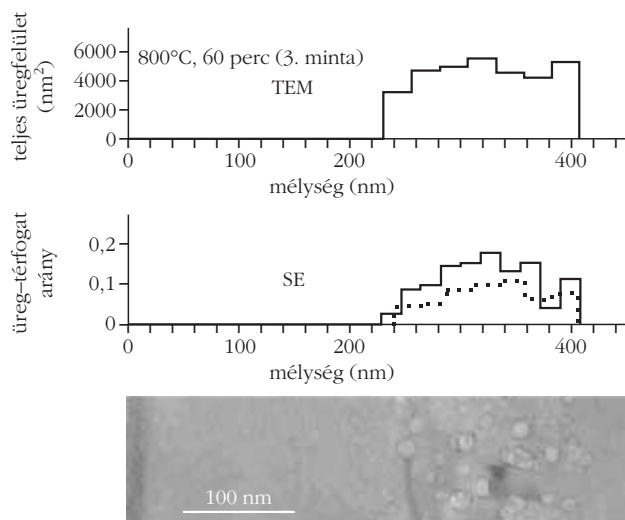
4. ábra. Hibatérkép 10-rétegű modellre, a rétegvastagságot és az űregarányt az 5. rétegben változtatva.

között) ebben a hullámhossz-tartományban jól látható. A megfelelő beesési szög kiválasztása ugyancsak fontos, mert 70°-os és 80°-os beesési szögek mellett a $\cos\Delta$ -spektrumokból eltűnik a struktúra, és belesimulnak a -1 , illetve $+1$ tengelybe. A folytonos vonalak azt mutatják, hogy megfelelő optikai modellel a mért spektrumok igen jól illeszthetők.

Az optikai modellben az üregeket tartalmazó tartományt alrétegekre bontjuk. Az alrétegek törésmutatójának számolásakor feltételezzük, hogy azok egykristályos szilícium- és üregfázisok keverékeként írhatók le. Ez a feltételezés akkor igaz, ha a fázisok mérete sokkal kisebb, mint a vizsgáló fény hullámhossza, de elég nagy ahhoz, hogy a tömbi törésmutató-referencia használható legyen. Ezután az alrétegek törésmutatóját az üreg-térfogó aránya mint illesztett paraméter fogja megadni.

Az illesztés jóságának adott paramétertől való függése két változó paraméter esetén hibafelülettel szemléltethető. A 4. ábra egy tízréteges modellben mutatja, hogy az illesztés jósága hogyan függ az 5. réteg vastagságától és üregkoncentrációjától. Látható, hogy 20%-os üregkoncentráció környékén a rétegvastagság függvényében több lokális minimum is található, amelyekbe a gradiensmódszerrel végzett paraméterillesztés „beragadhat”. Ezért fontos, hogy ezt a lépést kiterjedt „paraméterkeresés” előzze meg, amelynek során a feltételezett paramétertartományban véletlenszerű paraméterkombinációkra kiszámoljuk az illesztés hibáját, és a gradiensillesztést csak a legjobb értékekről (a feltételezett globális minimum „oldalfala”) indítjuk.

Ennek köszönhetően kiváló egyezést kapunk a transzmissziós elektronmikroszkópiával meghatározott üregprofilal. A paraméterek számának csökkentésére lehetőség van a profil adott függvényrel való leírására. Legjobb egyezést azonban független üreg-térfogó arány paraméterekkel kaptunk, valamint az alrétegek vastagságát egymáshoz csatoltuk. A rétegvastagság csatolása azt jelenti, hogy minden alréteg vastagsága ugyanakkora, ezt az egy vastagságértéket



5. ábra. Üregprofil keresztmetszeti transzmissziós elektronmikroszkópiával (TEM) és spektroszkópiai ellipszometriával (SE). A pontozott vonal a kevesebb alréteggel számolt, durvább számolás eredményét mutatja.

viszont illesztjük. Ebben az esetben az ellipszometriával a getterezési határfelületen (kb. 400 nm mélységben) az üreg-térfogó arányban található csúcsot is sikerült kimutatni (5. ábra).



A szerzők köszönetüket fejezik ki egykori és jelenlegi munkatársaiknak az eredmények eléréséhez bármilyen módon nyújtott segítségükért. Az olvasókat pedig arra bátorítják, hogy a további részletek megismerése céljából látogassák meg az MTA MFA ellipszometriai laboratóriumának honlapját: <http://www.mfa.kfki.hu/photondp/ndestest/ellipso/index.html>

Irodalom

1. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara: *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1977.
2. Fried M., Lohner T., Petrik P., Polgár O., Volk J.: Ellipszometria a vékonyréteg-technológiában. *Fizikai Szemle* 53/6 (2003) 200.
3. G. Forgács. *Journal of Physics D., Applied Physics* 3 (1970) 1513.
4. G. Gergely, G. Forgács, B. Szűcs, Dao van Phouc: *Ellipsometric Tables of the Si-SiO₂ System for mercury and He-Ne Laser Spectral Lines*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
5. M. Fried, T. Lohner, E. Járóli. G. Vizkelethy, A. Kótai, J. Gyulai, A. Biró, J. Ádám, M. Somogyi, H. Kerkow: Optical properties of thermally stabilized ion implantation amorphized silicon. *Nuclear Instruments and Methods B* 19/20 (1987) 577.
6. G. Mezey, T. Nagy, J. Gyulai, T. Lohner, M. Somogyi: Substoichiometric native oxide layers on GaP studied by He backscattering. *Thin Solid Films* 43 (1977) L23.
7. M. Somogyi, M. Farkas-Jahnke, G. Mezey, J. Gyulai: Investigation of surface layers produced by chemical treatment of GaP. *Thin Solid Films* 60 (1979) 377.
8. C. Robert, L. Bideux, B. Gruzza, M. Cadoret, T. Lohner, M. Fried, A. Vazsonyi, G. Gergely: Spectroellipsometry and electron spectroscopy of porous Si thin films on p+ substrates. *Thin Solid Films* 317 (1998) 210.
9. T. Lohner, G. Mezey, E. Kótai, F. Pászti, L. Királyhidi, G. Vályi, J. Gyulai: Ellipsometric and channeling studies on ion-implanted silicon. *Nuclear Instruments and Methods B* 182/183 (1981) 591-594.
10. P. Petrik, F. Cayrel, D. Alquier, M. Fried, T. Lohner, O. Polgár, J. Gyulai: Optical models for cavity profiles in high-dose helium-implanted and annealed silicon measured by ellipsometry. *Journal of Applied Physics* 97 (2005) 123514.

PERIODIKUS NANOSTRUKTÚRÁK MAKROSZKOPIKUSAN NAGY FELÜLETEKEN

Nagy Norbert¹, Pap Andrea Edit¹, Deák András²,
Horváth Enikő¹, Hórvölgyi Zoltán², Bársony István¹

¹MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék

Nanotechnológia, fotonika, plazmonika. Elég fellelőzni a *Fizikai Szemle* februári és áprilisi számát, hogy színvonalas áttekintést kapjunk e népszerű kutatási területek szépségeiről, az új jelenségekben rejlő izgalmas lehetőségekről és kiaknázásuk inspiráló kihívásairól [1–3]. Rácsodálkozhattunk az elektromágneses sugárzás és a hullámhosszával összemérhető periodicitású szerkezet kölcsönhatásakor a szemünk, műszerünk elé táruló új effektusokra.

A tudományos világ lelkesen hódítja az új kihívást jelentő csúcspontokat, hiszen például a fotonikus kristályok tervezése és modellezése az elméleti szakemberek számára jelent szép feladatot, míg előállításuk folyamatosan a technológia teljesítőképességének határába ütközik. Nem csoda hát, hogy a leginkább előrehaladott eredményeket a szilíciumfotonika terén érték el, mert ez a technológia – a jól ismert okokból – a leginkább kidolgozott.

Gondoljunk bele, hogy például egy szilíciumszelet felületén, két dimenzióban, periodikus szerkezetet kell létrehozni. Ennek kialakításához – az egyszerűség kedvéért – fúrjunk adott mélységű, négyzet alakban elhelyezkedő lyukakat a szeletbe 300 nm-es periódushosszal. A meglévő, jól kézben tartható technikákkal ez nem is okoz gondot: például fókuszált ionnyalábbal a kívánt felbontásban is megoldható. Sőt, elektronsugaras litográfiával ablakokat nyitva a szilíciumfelület rezisztbevonatába, majd megfelelő elektrokémiai marás alkalmazásával [4] ugyancsak sikert érhetünk el. Ellenben mindkét említett nyaláb egyenként alakítja ki az objektumokat! Amíg „nanoterületeken” képzeljük el mindezt, sehol semmi gond, de makroszkopikus felületek esetén – még kétdimenziós periodicitás is – ésszerű idő alatt bajosan megoldható. Hiszen egy 3×3 cm²-es felület megmintázása 300 nm-es periódushosszal 10^{10} db lyukat jelent. Ez nagyjából olyan feladat, mint a Duna–Tisza-közén méterenként ásni egy gödröt.

Tehát alapvetően más megközelítés kell. A „fentről lefelé” megmunkálás („kifaragás”) helyett feltétlenül szükségünk van egy rendszerre, amely „lentől felfelé” és lehetőleg „magától” hozza létre a kívánt rendet – makroszkopikus méretben, de nanoméretű objektumokból.

Ez az igény ihlette a cikkben bemutatott kísérlet-sorozatot. Az eljárás az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszékének Kolloidika Csoportja interdiszciplináris – s kimondhatjuk: példaértékű – együttműködésének eredménye.

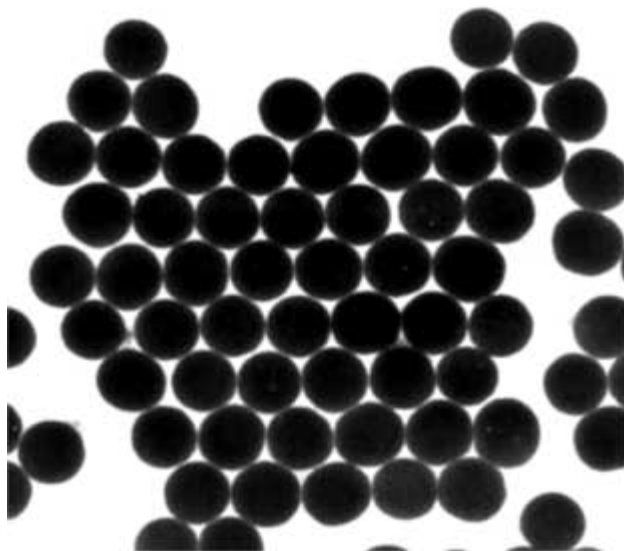
Bizony, kolloidika! A kolloidkémia anyagi rendszereinek jelentős része nanoszerkezetű, és felhalmozott hatalmas tudásanyaga, valamint kidolgozott, rutinszerű eljárásai, módszerei kiváló eszközök lehetnek a nanotechnológia szerszámosládájában. Válogassunk hát belőlük!

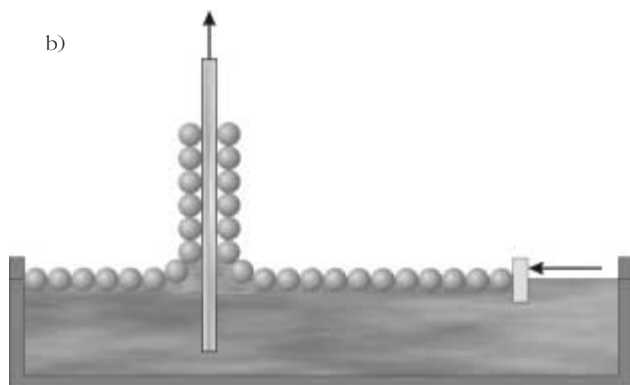
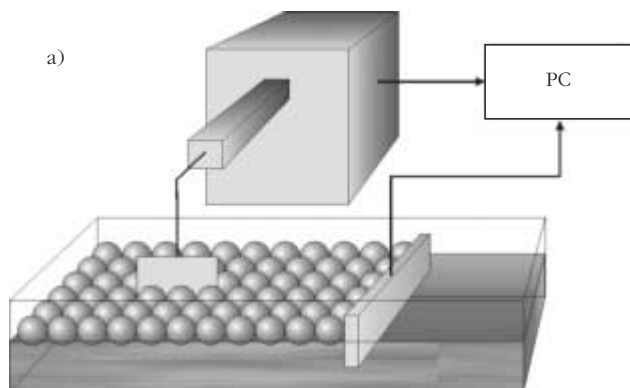
Szilika-részecskék és a Langmuir–Blodgett-technika

Stöber és munkatársai olyan egyszerű eljárást dolgoztak ki – még 1968-ban – amellyel alkoholos közegű szilika (SiO₂) diszperziókat állíthattak elő, tetraalkilortoszilikátok kontrollált hidrolízisével. A módszer szűk méreteloszlású, gömb alakú részecskéket eredményezett, amelyek átmérője a kiindulási reagensek összetételén keresztül 20 nm – 2 μm intervallumon belül pontosan beállítható (1. ábra).

Hogyan készíthetünk egyszerűen rendezett periodikus szerkezetet az elkészített szilika diszperziókból? Folyadékfelszíni, oldhatatlan monomolekulás filmek vizsgálatára mintegy száz éve alkalmazzák a *filmmérleget*. Mikro- és nanorészecskék filmmérlegbeli tanulmányozásának elterjedése főként az elmúlt évtizedben jellemző. A filmmérleg alapját egy jellemzően teflonból készült kád képezi, mely a szubfázist alkotó folyadékkal – esetünkben nagytisztaságú vízzel – van töltve (2.a ábra). A vizsgált anyag terítését

1. ábra. 350 nm átmérőjű Stöber-szilikarészecskék transzmissziós elektronmikroszkópos felvétele.





2. ábra. Az úgynevezett Wilhelmy-típusú filmmérleg (a) és a Langmuir–Blodgett-filmek előállításához használt filmhúzó apparátus (b) sematikus ábrája.

követően a molekula- vagy részecske-réteget (mely a tapasztalatok szerint monomolekulás, illetve monorétegű) mozgatható korlát segítségével komprimálják. Így a határfelületen csapdázódott molekulák, illetve részecskék egyre közelebb kerülnek egymáshoz, tömör szerkezetű filmet képezve. Komprimálás közben mérhető a filmek oldalnyomása (az összenyomással szemben megmutatkozó ellenállása), amelynek ismerete fontos a későbbi filmképzési eljárás szempontjából.

Mozgó korlát(ok) segítségével a filmet komprimálva a réteg tömörödik, majd az oldalnyomás hirtelen növekedését tapasztaljuk. Az oldalnyomás egészen a kollapszusig egyenletesen meredeken nő, ezután a film szerkezete letörik, ami az oldalnyomásgörbe emelkedésének megtörésében mutatkozik meg. A kollapszus után – a részecskék nedvesedési tulajdonságaitól függően – a részecskék vagy kiszorulnak a határrétegből a szubfázisba, vagy a réteg gyűrődése figyelhető meg. Egy szemléletes képpel élve: peremmel határolt asztallapon szétszórt kétforintosokat tolnunk össze egy vonalzóval. Amíg az érmék egymástól távol vannak, könnyű őket tömöríteni. Ha már érintkeznek, nagyobb erőre van szükség ahhoz, hogy még szorosabb illeszkedésre kényszerítsük őket. Végül, mikor az érmék hirtelen egymás hátára ugranak, elérjük a kollapszust.

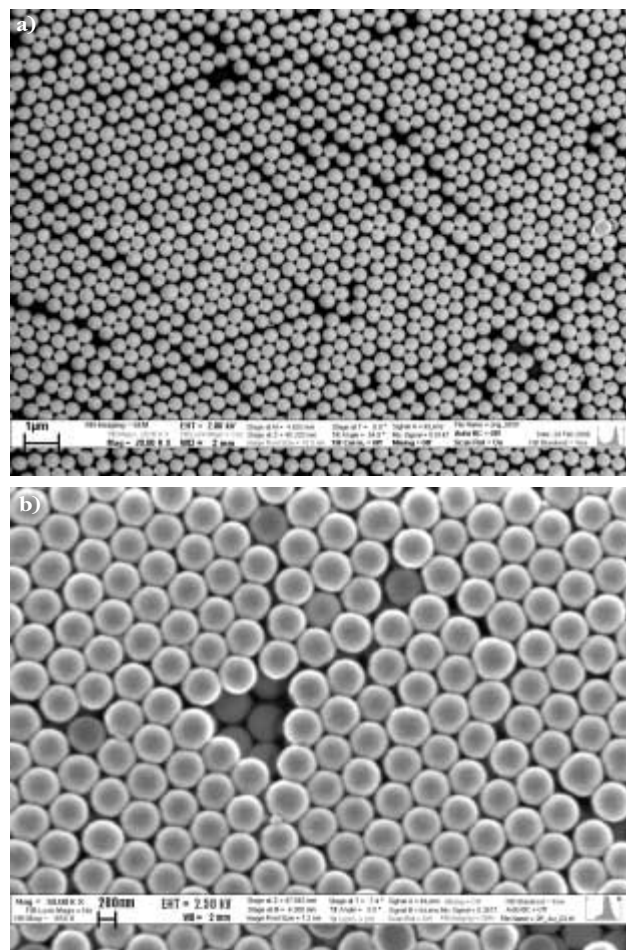
A Langmuir–Blodgett (LB)-technika (1937) lényege, hogy filmmérlegben komprimált, vízfelszíni molekulás, illetve részecskés filmek [5] különböző szubsztrá-

tumokra telepíthetők, a szilárd hordozó függőleges irányú kihúzásával a szubfázisból (2.b ábra). A rétegképzési folyamat elvileg tetszőleges alkalommal ismételtető, így többrétegű, rendezett szerkezetű filmek is kialakíthatók. Tehát a technika lehetővé teszi, hogy egy lépésben, akár szeletméretű felületre vigyünk fel monorétegű filmet, melyben a nanogömbök szabályos rendben, szoros illeszkedésben helyezkednek el. Többrétegű film készítéséhez a lépést egyszerűen meg kell ismételni. Ekkor, természetesen, a következő réteg is a szoros illeszkedésnek megfelelően helyezkedik el az alatta lévő rétegen (3. ábra).

Részecskefilmek alkalmazása – maszkként

Láttuk, hogy a LB-technika jól kézben tartható és hatékony eljárás egy-, illetve többrétegű rendezett szerkezetű – ha nem is tökéletesen hibamentes – részecskefilmek nagy felületű, akár szeletméretű, szilárd hordozóra telepítéséhez. A kérdés már csak az, hogyan képezhető át a LB-film részecskeátmérőnek megfelelő periodicitása a szilíciumfelület domborzati mintázatává – vagyis kétdimenziós fotonikus szerkezetté? Kísérletsorozatunk [6] a következő elgondoláson alapul: megfelelő (350 nm) átmérőjű Stöber-szilikarészecskék

3. ábra. 350 nm átmérőjű Stöber-szilikarészecskékből készült egy- (a) és kétrétegű (b) LB-film FESEM-felvétele.

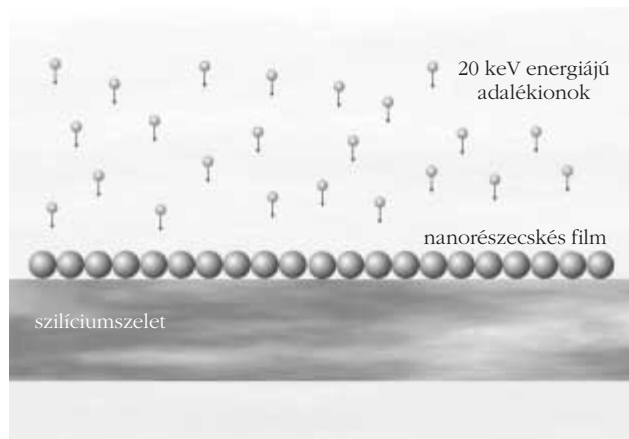


LB-rétegeit használjuk maszkként adalékionok implantációjakor (4. ábra). A részecskék átmérőjének pontos ismeretében (Monte-Carlo szimulációk alapján) jól megválasztható az az implantációs energia, amelynél az ionok biztosan megállnak a részecskékben, köztük pedig eléri a hordozó felületét. A szilíciumszelet felső rétegében így periodikus adalékkoncentráció-eloszlást hozunk létre. A maszkréteg eltávolítása és megfelelő hőkezelés (a keltett rácshibák relaxációja és az implantált adalékionok elektromos aktiválása) után – a szilícium elektrokémiai marásával alakítható domborzati struktúrává (5. ábra). Erről az eljárásról és alkalmazási lehetőségeiről bővebben [4]-ben olvashatunk. Most elég annyit tudnunk, hogy a marás preferenciálisan ott zajlik, ahol a lyukak – mint töltéshordozók – koncentrációja nagyobb. Ahol a marási front áthaladt, pórusos tartományok alakulnak ki. A „szivacsbeli” pórusok mérete és a megmaradt kristályos szilíciumváz falvastagsága a marás elektromos paramétereinek és a szelet adalékkoncentrációjának függvénye. Esetünkben a pórusok mérete körülbelül 10–15 nm. A pórusos részek végül lúgos marással egyszerűen leoldhatók.

Változatos szerkezetek reményében implantáljunk p- és n-típusú szilíciumot bórral is, foszforral is! A különböző eseteket az áttekinthetőség kedvéért – néhány számszerű adattal – az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A periodikus szerkezetek kialakulásáról közvetlenül a marás után tudomást szerezhetünk, mert a diffrakció már szabad szemmel is megfigyelhető! A félbetört minták egyik feléről lúgos marással oldjuk le a pórusosra mart részeket, ezekről téremisszós pásztázó elektronmikroszkóppal (FESEM) felülnézeti képeket, a változatlanul hagyott darabokról keresztmetszeti felvételeket készíthetünk.

4. ábra. A kulcslépés szemléltető ábrája: szilika LB-film alkalmazása maszkként az ionimplantációhoz.

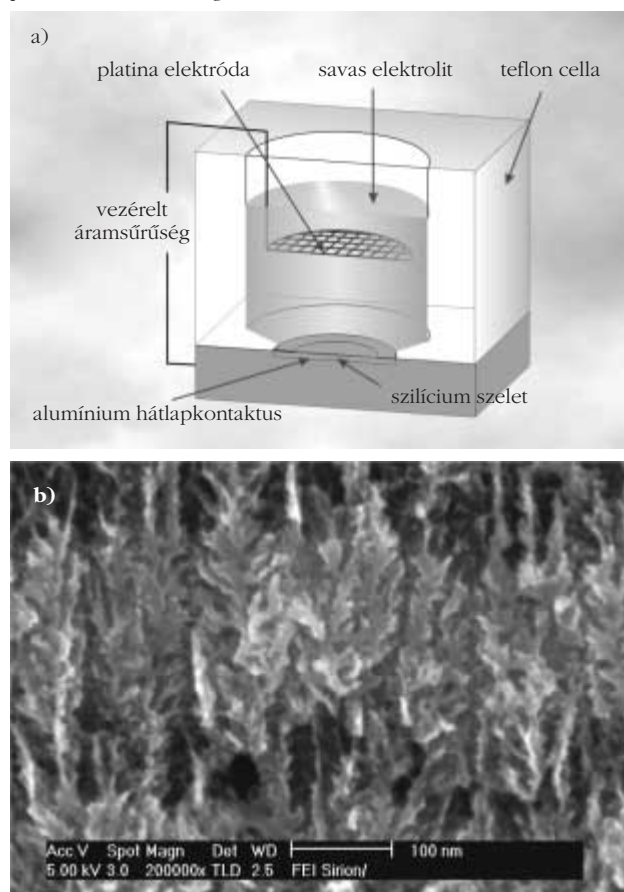


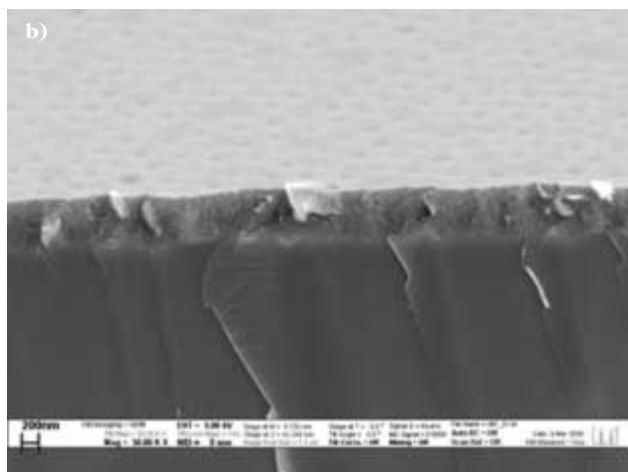
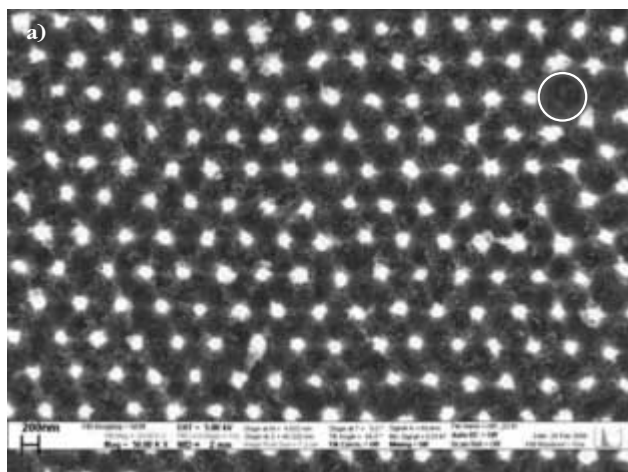
1. táblázat A kísérletsorozat főbb technológiai paramétereinek összefoglalása			
implantált ionok (20 keV, 10^{14} ion/cm ²) relaxáció: 600 °C, 30 min; aktiválás: 900 °C, 60 min			
kiindulási szelet (100)	bór (120 nm, 10^{19} cm ⁻³)		foszfor (50 nm, 10^{19} cm ⁻³)
p-típusú (10–15 Ωcm) (10^{15} cm ⁻³)	egyrétegű maszk 7:3 HF:etanol; 25 mA/cm ² ; 12 s	kétrétegű maszk 7:3 HF:etanol; 25 mA/cm ² ; 12 s	egyrétegű maszk 7:3 HF:etanol; 25 mA/cm ² ; 12 s
n-típusú (4–6 Ωcm) (10^{15} 1/cm ³)	egyrétegű maszk 7:3 HF:etanol; 25 mA/cm ² ; 14 s előlap-megvilágítás		egyrétegű maszk 7:3 HF:etanol; 25 mA/cm ² ; 14 s előlap-megvilágítás

Az eredményül kapott szerkezetek és kialakulásuk értelmezése

Az egyrétegű LB-maszkon keresztül bórral implantált, p-típusú minta (6. ábra) esetén a marás preferenciálisan az implantált régiókban zajlott, vagyis a nanorészecskék közti „hézagoknak” megfelelő felületen. Ennek bizonyítékát is felfedezhetjük, például a 6.a ábrán látható felülnézeti képen. Ahol a maszkoló LB-rétegben részecskvakancia – befagyott lyuk – volt, a kristályos szilícium oszlop hiányzik,

5. ábra. Az elektrokémiai marató cella sematikus rajza (a) és mikropórusos szilícium réteg keresztmetszeti FESEM-felvétele (b).



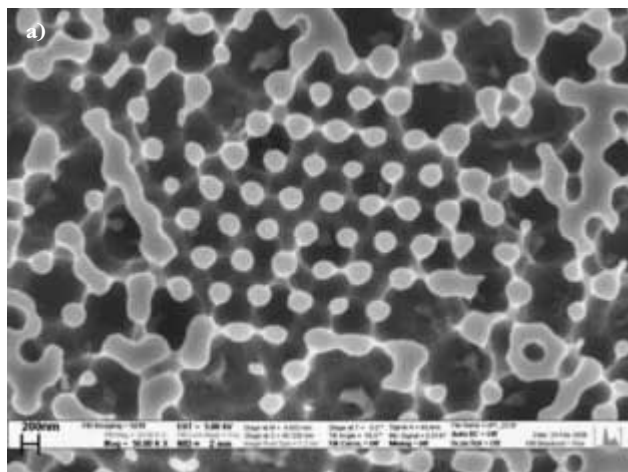


9. ábra. A bórral implantált n-típusú minta felülnézeti FESEM-felvételei a pórusos tartományok leoldása után (a), illetve megdöntött keresztmetszeti képe a pórusos szilícium leoldása előtt (b).

lantált területekből indult, és haladt lefelé, illetve oldalra. Így jött létre a 7. ábrán látható méhsejtszerű szerkezet.

A 7.b ábrán látható keresztmetszeti képen nyilak jelölik a pórusos területeket elválasztó kristályos szilíciumgátakat.

10. ábra. A foszforral implantált n-típusú szeletről készült felülnézeti FESEM-felvételek a pórusos szilícium leoldása után (a), illetve a megdöntött keresztmetszeti kép a lúgos marás előtt (b).

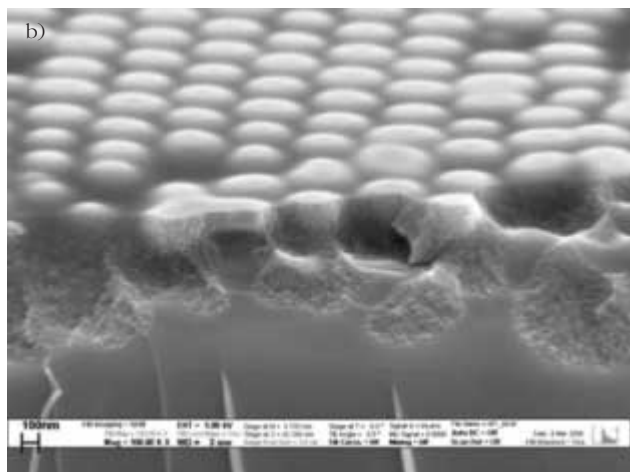


Az egyrétegű maszkon keresztül foszforral implantált, p-típusú szelet esetén a marás ott zajlott, ahol az ionok nem érték el a hordozót, tehát a maszkként szolgáló nanogömbök alatt. A maszkoló LB-filmbeli tökéletlenségek – hasonlóan az első mintához – itt is felfedezhetők a 8.a ábra felülnézeti felvételén. A keresztmetszetről készült kép (8.b ábra) rendkívül érdekes! Látható, hogy a felület nem-implantált területeiről indult marási front végig bezárva haladt az át-implantált térfogat által határolt részben, majd túljutva az ionok behatolási mélységén kiszabadult, izotróp módon haladt tovább. Így keletkeztek ezek a pórusos szilíciummal töltött zsákok.

A bórral implantált n-típusú minta esetén a marás az implantált tartományokban zajlott preferenciálisan – hasonlóan a bórral implantált p-típusú szelethez. A 9. ábra (a) felvételén látható, hogy a szerkezet is azonos, kristályos szilíciumoszlopok maradtak a nanorészecskék által maszkolt területeken. Az LB-film átöröklött hibái itt is megfigyelhetők. A törettel ez esetben nem volt szerencsénk, a 9. ábra (b) része nem szolgáltat további információt.

A foszforral implantált n-típusú szelet adta a legkevésbé tiszta struktúrát az elektrokémiai marás után, ezt láthatjuk a 10. ábra (a) részén. A keresztmetszeti kép (10.b ábra) tanúsága szerint a marás preferenciálisan – a várákosoknak megfelelően – az implantált tartományokban zajlott. Ezenkívül megfigyelhetjük, hogy a marási front elérve az ionok behatolási mélységét itt is izotróppá vált, megindult a nem-implantált kristályos területek alámarása. A pórusos tartományok leoldásakor egyes helyeken az alámart kristályos szigetek felszakadhattak, ez okozta a nagyobb kiterjedésű hibadús régiók kialakulását.

Említést érdemel még, hogy a mintasorozatról készült keresztmetszeti képek analízise alapján az elektrokémiai marás során kialakult pórusos réteg vastagságára p-típusú alapszelet esetén 400–450 nm-t, míg az n-típusú mintáknál 500–550 nm-t mértünk, tehát szerkezeteink mélysége-magassága ebbe a nagyságrendbe esik.



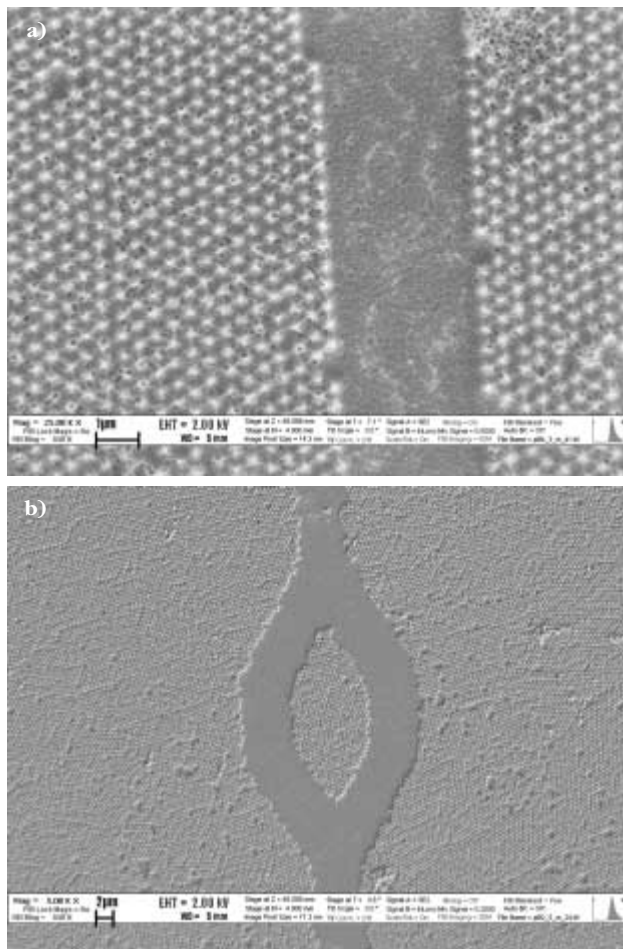
Merre tovább?

Az elektrokémiai marás paramétereinek optimalizációján és a technológia teljesítőképességének felderítésén túl (pl. milyen magas szilíciumoszlopok készíthetők így?), a bórral implantált p- és n-típusú minták esetén izgalmas lehetőség lenne, ha a marás során a marási áramsűrűség periodikus változtatása – a várákosoknak megfelelően – periodikus porozítású tartományok létrejöttét eredményezné a kristályos oszlopok között. Ezzel három dimenzióban periodikus fotonikus kristályt kapnánk, melynek periodicitása és (effektív) törésmutató-kontrasztja tág határok közt beállítható. És mindez immár egyszerűen, nagy térfogásban is létrehozható!

Az egyik mintatípus esetében volt egy külön várákozásunk is. Fotonikus szerkezetek kialakítása gyakran makropórusos szilíciumból történik [4]. A rendezett pórusszerkezet létrehozásához a felület előmintázása szükséges, amit többnyire – a már említett módokon – elektronsugaras litográfiával vagy fókuszált ionnyalábbal végeznek. A foszforral implantált p-típusú minta esetén az elektrokémiai marást rövidebb ideig végezve éppen a szükséges rendezett előmintázatot kapjuk – természetesen, amíg a marási front nem éri el az implantált régió alját. Tehát egy rövid idejű elektrokémiai maratás után folytathatjuk az eljárást a p-típusú szelet makropórusos marásának megfelelő módon.

Végezetül szeretnénk rámutatni – tekintve, hogy a Langmuir-részecskés filmek szükségszerűen tartalmaznak hibákat, hibahelyeket – célunk az eljárás alkalmazhatóságának demonstrálása volt. Az igazi áttörést eljárásunk kombinálása adhatja új, önszervező, szerves kémiai módszerekkel. Az általuk eredményezett rendszereket „sablonként” felhasználva, tökéletesen rendezett és hibamentes, szilikagömbökből álló, egy-, illetve többretegű filmek, ezáltal hibátlan fotonikus szerkezetek hozhatók létre.

A cikk terjedelmi korlátai nem teszik lehetővé, hogy a következő – a téma szervesen folytatását jelentő – kísérletről is beszámoljunk. Így csak megemlíteni szeretnénk, hogy következő lépésünk annak bemutatása volt, hogyan lehet a maszkoló LB-filmet mikrométeres skálán tetszőlegesen strukturálni, megmintázni. Ezáltal – egyszerűen előállítható fotonikus kristályhullámvezetők reményében – például utcát nyitni a kristályos szilíciumoszlopok erdejében (11. ábra).



11. ábra. Strukturált LB-filmen keresztül bórral implantált, p-típusú szelet felületén kialakított, kristályos szilícium-oszlopokkal körülvett kanyonok.

Irodalom

1. Gyulai J.: Nanotudomány, nanotechnológia. *Fizika Szemle* 57/2 (2007) 71.
2. Márk G.I., Bálint Zs., Kertész K., Vértesy Z., Bíró L.P.: A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái. *Fizikai Szemle* 57/4 (2007) 116.
3. Kroó N.: Fényes új világ: egy új típusú fény és alkalmazásai. *Fizikai Szemle* 57/2 (2007) 37.
4. Nagy N., Volk J., Tóth A.L., Hámosi A., Bársony I. Optikai érzékelők nanoszerkezetű szilíciumból. *Élet és Tudomány* 36 (2006) 1130.
5. Deák A., Bancsi B., Tóth A.L., Kovács A.L., Hórvölgyi Z.: Complex Langmuir–Blodgett films from silica nanoparticles: an optical spectroscopy study. *Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 278 (2006) 10.
6. Nagy N., Pap A.E., Deák A., Horváth E., Volk J., Hórvölgyi Z., Bársony I.: Large area self-assembled masking for photonics applications. *Applied Physics Letters* 89 (2006) 063104.

ОГЛАВЛЕНИЕ

И. Альпар: Первый полет космической эры
Соревнование научных исследований (Д. Кадар, Н. Баршонь)
Д. Гергель, Ш. Гурбан, А. Шуйюк, М. Менггард: Определение параметров транспортных процессов электронов
Г. Вертеши, М. Пардаби-Хорват: Магнитное поведение монокристаллических микропорошков
Ж. Золини, Н. Хан, Г. Батистиг: Роль канального эффекта в электронных пучках приборов аналитики и ионной имплантации
Т. Лонер, Д. Гергель, П. Петрик, М. Фрид: Применение эллипсометрии в исследованиях полупроводниковой физики
Н. Надь, А.Э. Пал, А. Дзак, Э. Хорват, З. Горбёли, И. Баршонь: Периодические наноструктуры на макроскопических поверхностях

А. Берни: Движение электронов в белках
И. Сергени: Роль коллективного обучения, науки и развития технологий в энергетической политике
Р. Ланг: Аллея ученых

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Высший учебный курс «Обучение физике» на Будапештском университете им. Этвеша (А. Югас)
Отчет Рокара (интервью Ж. Сладис с П. Черчелли)

ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Szent-Györgyi Albert éppen 70 évvel ezelőtt kapott Nobel-díjat biokémiai kutatási eredményeiért [1], azonban a fizikusok és a fizika iránt érdeklődők számára Szent-Györgyi Albert neve elsősorban és legerősebben a bioelektronika, vagy más megközelítésben a kvantum-biokémia tudományának megteremtésével, az elektronok biológiai folyamatokban betöltött különleges szerepének hangsúlyozásával fonódik össze [2]. Évtizedek biokémiai kutató munkája során ugyanis Szent-Györgyi Albert a következő, másokat nagyon meglepő következtetésre jutott [3]:

„Az élet hajtóanyaga az elektron, pontosabban az elektron által a fotoszintézis során a fény fotonjaiból nyert energia; ezt az energiát az elektron, keresztülhaladva a sejt gépezetén, fokozatosan leadja. ... A biológiai reakciók csodálatos finomsága nem származhat pusztán molekuláktól, hanem sokkal kisebb és mozgékonyabb egységektől, s ezek az egységek aligha lehetnek mások, mint az elektronok. Az élet főszerepét szükségszerűen az elektronoknak kell játszaniuk, míg a nehézkes és kevésbé reakcióképes fehérjemolekuláknak kell létrehozniuk azt a színpadot, ahol ez a dráma játszódik. Az elektronok mozgékonyaságuk érdekében elektromos vezetőt igényelnek, ami engem arra a következtetésre vezetett, hogy a fehérjék az elektromos vezetők. ... 1941-ben azzal az ötlettel álltam elő, hogy a fehérjék, bizonyos körülmények között, elektromosan vezetők lehetnek.”

Tisztán látható tehát, hogy a nagy magyar orvos-biokémikus gondolatai már a Nobel-díj átvételekor is az elektronoknak a biológiai folyamatokban betöltött meghatározó szerepe körül forgolódtak. Élete hátralevő részének munkássága ennek a gondolatnak konkrét tartalommal való megtöltéséről szól.

Az „elektronvezető fehérjék” gondolat megszületése óta nagyon sok tekintetben finomodott és pontosodott Szent-Györgyi Albert zseniális meglátása. Napjainkban, a molekuláris biológiában rutinszerűen használt rekombináns fehérjék segítségével – valamint ezek pontmutációval módosított változatai révén – lehetőség nyílt a fehérjéken belüli elektronmozgások feltérképezésére is.

A probléma körvonalazódik

Az életjelenségek egyedisége és összessége – általában minden biológiai folyamat – molekulák között lejátszódó kémiai folyamatok eredménye vagy összessége. Ezen folyamatokban a molekulákat alkotó atomok elektronhéjain található, a molekulák kialakulásában is résztvevő elektronok kapnak ismét meghatározó szerepet. A 20. század elején tisztázódott az ato-

mok szerkezete, felfedezték az atomi méretekben uralkodó törvényszerűségeket, megszülettek a jelenség leírására alkalmas elméletek és technikák is (kvantummechanika, mátrixtechnika, differenciálgeometria stb.). Ezekre alapozva a kémiában is pontosabb értelmezést kaptak a különböző erősségű és természetű kémiai kötések. Világossá vált, hogy az atomokból összeálló molekulákat, majd a kisebb molekulákból felépülő makromolekulákat is az alkotóelemeként szereplő atomok legkülső elektronhéján található elektronok viselkedése és tulajdonságai határozzák meg. Megszületett a kémiai kötések kvantummechanikai alapokon nyugvó értelmezése, a kvantumkémia [4], és ma már – a számítástechnika elképzelhetetlenül gyors fejlődésének köszönhetően – egyre nagyobb lehetőség nyílik a molekulák belső „szerkezetének” (fehérjék esetében ez az ún. másodlagos és harmadlagos szerkezetet jelenti) számolások alapján történő modellezésére is [5].

Az élő szervezeteket felépítő anyagok egyik legjellegzetesebb csoportját alkotják a fehérjék. Ezek olyan makromolekulák, amelyek lényegében 20-féle aminosav-molekulából alakulnak ki, akár több száz aminosavegységből is állhatnak, meghatározott szerkezettel rendelkeznek, és jól meghatározott feladatokat látnak el. Ráadásul a fehérjék szerkezete – a környezettel való állandó kölcsönhatás miatt – dinamikus struktúra, ami alatt azt kell érteni, hogy minden fehérje számtalan, energetikailag egymáshoz nagyon közel álló szerkezet között fluktuál, és véletlenszerűen vesz csak fel egy meghatározott szerkezetet. Ennek következménye például az, hogy a fehérjeszerkezeteket számon tartó adatbázisokban többféle (kissé eltérő) szerkezet is található egyugyanazon fehérjére vonatkozóan, attól függően, hogy a kristályosítás során – a különböző körülmények hatására – éppen milyen konformációban „fagyott meg” a molekula.

A fehérjék egy részét enzimeknek nevezzük. Az enzimek olyan fehérjék, amelyek valamilyen, a természetben csak nagyon lassan lezajló kémiai reakció sebességét nagyságrendekkel képesek megnövelni, azaz a reakció lefutását katalizálni. Az enzimkatalizálta reakciók tetemes hányada az úgynevezett oxidációs-redukációs (röviden redox) reakciók kategóriájába tartozik. Az ilyen folyamatokban az enzim egy redox fehérje, mely olyan folyamatot katalizál, amelyben az elektron eljuthat az egyik molekuláról, a redox fehérjén keresztül, a másik molekulára. A redox fehérjék mindegyike rendelkezik legalább egy úgynevezett aktív centrummal, ahol egy redox aktív molekula (vagy atom) található a fehérjéhez kötve. A legtipikusabb redox aktív molekula – szokás kofaktoroknak is nevezni – a hemek, a vas-kén kockák és a flavinok, de aktív centrumként szerepelhetnek redox aktív fémionok is, mint például a vas-, réz-, mangán-, cinkionok. A redox fehérje tulajdonságait a redox aktív centrum(ok) tulajdonságai(i)

A dolgozat megírását az OTKA T-043425 és T-049207 pályázatok támogatásai tették lehetővé.

határozza (határozzák) meg. Például a citokróm *c* molekulában egy kovalensen kötött hem, a citokróm *b₅* fehérjében egy nem-kovalensen (koordinatív kötésekkel) kötött hem, az azurinban egy Cu-ion, a humán SOD2 (szuperoxi-diszmutáz) fehérjében egy Mn-ion, a SOD1 fehérjében viszont egy Cu- és egy Zn-ion, a monodehidroaszskorbát-reduktázban egy flavin, a citokróm *b₅₆₁* fehérjében két nem-kovalensen kötött hem, a citokróm *c* oxidázban 3 Cu-ion és 2 hem, a Cpl hidrogénázban (a *Clostridium pasteurianum* baktériumban) pedig 5 vas-kén kocka található.

A redox fehérjék között találunk olyanokat, amelyek biológiai membránokba ágyazódva a membrán egyik oldaláról átszállítják az elektront a membrán másik oldalára. Az ilyen elektront transzportáló és transzmembrán elhelyezkedésű fehérjék a legtipikusabb „elektronvezető fehérjék”. Ezekben mindig egy-nél több redox aktív centrum található. A bioenergetika fellegráinak számító mitokondriális és fotoszintetikus elektrontranszport-láncban számtalan, több redox centrummal is rendelkező, transzmembrán elhelyezkedésű fehérjekomplexet is találhatunk.

A probléma tehát körvonalazódni látszik. A redox fehérjék vagy (i) felvesznek egy elektront egy elektron-donor-molekuláról, azt tárolják, térben elszállítják egy másik helyre, és ott átadják egy elektronakceptor-molekulának (pl. citokróm *c*, citokróm *b₅*), vagy (ii) megkötik az elektrondonor- és elektronakceptor-molekulákat, és saját „testükön keresztül” eljuttatják az elektront a donortól az akceptorig. Ezen utóbbi esetben az elektrondonor- és elektronakceptor-molekula lehet ugyanabban a kompartmentben (pl. monodehidroaszskorbát-reduktáz, SOD1) vagy két különböző kompartmentben (pl. a citokróm *b₅₆₁* vagy a citokróm *c* oxidáz esetében).

A redox reakciókat két nagy osztályba sorolhatjuk: az úgynevezett belsősférás és az úgynevezett külsősférás elektrontranszferrel járó folyamatok. Az első esetben a két redox aktív anyag elektrónhéj-szerkezetei valamilyen mértékben átlapolódnak (kémiai kötés jön létre a redox partnerek között). A második esetben ilyen kapcsolat nem keletkezik a redox folyamatban szereplő két redox centrum között.

A redox fehérjékben található redox aktív centrumok egy jól meghatározott „fehérje”-környezetben helyezkednek el, amely a legtöbb esetben közvetlenül nem, vagy csak éppen érintkezik a fehérjét körülvevő vizes fázissal. Márpedig az elektrondonor- és elektronakceptor-molekulák legtöbbször kisméretű, vízdékony molekulák (pirridin-dinukleotidok, aszkorbinsav, glutation stb.). Már most érezzük, hogy a redox fehérjék esetében a redox folyamatok az utóbbi, a külsősférás elektrontranszfer (ET) reakciók kategóriába tartoznak. Különösen igaz ez akkor, amikor a fehérjén belül találunk több redox aktív centrumot, amelyek egymástól mért távolsága nagyobb néhány tized nanométernél. Hogyan jut el az elektron ilyen körülmények között a donorról a fehérje aktív centrumához, a fehérje aktív centrumától az akceptorra, illetve nagyon sok esetben – még a fehérjén belül – az egyik redox aktív centrumtól a másik redox aktív centrumig?

Az alapok

Az már az „elektronvezető fehérje” gondolat megszületésekor is ismert volt, hogyan mozognak az elektronok a fémekben (vezetőkben) vagy a félvezetőkben. Ezek az elméletek nagy mértékben támaszkodtak a fémek és a félvezetők szerkezeti tulajdonságaira: az ezen anyagokat felépítő alkotórészek térbeli periodicitására és a rácspontokban szereplő atomok elektrónhéj-szerkezetére. Bár ezeken az alapokon törtétek próbálkozások a fehérjék ET-reakcióinak értelmezésére, a próbálkozások nem jártak eredménnyel. Ma már elég nyilvánvaló módon azért nem, mert ezek az elméletek nem voltak „ráhúzhatók” a fehérjékre – elsősorban azok geometriai mérete és struktúrája miatt. A fehérjék szerkezetében fellelhető periodicitás (gondoljunk az α -hélix, illetve a β -redős szerkezetek-re) – a fémekhez vagy félvezetőkhez képest – csak igen rövidtávú, és „szabad” elektronokkal sem találkozzunk bennük. A fehérjék esetében tehát vissza kellett nyúlni az elektron individuális mozgását leíró egyenletekhez, és hangsúlyt kellett kapniuk a fehérjék szerkezetében fellelhető szerkezeti specialitásoknak is.

Az elektron elemi részecske, mozgását tehát a kvantummechanika törvényei segítségével lehet leírni. A kvantummechanika „Fermi-féle aranyszabálya” (Fermi’s golden rule [6]) elnevezéssel illetik azt az egyenletet, amely megadja annak valószínűségét (W_{ab}), hogy egy elektron egy *a* állapotból átjuthasson egy *b* állapotba:

$$W_{ab} = \frac{2\pi}{\hbar} |H_{ab}|^2 \rho, \quad (1)$$

ahol $\hbar = h/2\pi$ (*h* a Planck-állandó) egy természeti állandó, H_{ab} az *a* és a *b* állapot közötti átmenetet leíró Hamilton-mátrix (ami a két elektronállapot közötti elektronikus csatoltság mértékét jellemzi), és ρ a *b* állapothoz tartozó állapotsűrűség, amely megadja egy bizonyos energiatartományon belüli alállapotok számát és elrendeződését. Minél nagyobb az elektront leíró *a* és *b* állapotokhoz tartozó hullámfüggvények „átfedése” (azaz minél szorosabb az elektronikus csatoltság), annál nagyobb $|H_{ab}|^2$ – és így természetesen W_{ab} – értéke is. Továbbá, minél számosabb a *b* állapothoz tartozó alállapotok száma, annál valószínűbb az elektronátmenet. A fehérjékre vonatkozóan tehát a megoldás kulcsa részint a ρ állapotsűrűséget leíró helyes kifejezés, részint az egymástól aránylag távol álló redox aktív centrumokat összekapcsoló elektronikus csatolás mikéntjének a megtalálása.

Fontos jellemzője az ET-reakcióknak, hogy

1) abban egy elektron kerül át az egyik (kvantummechanikai) állapotból egy másik (kvantummechanikai) állapotba,

2) a reakciók során se nem keletkeznek új, se nem törnek szét régi kémiai kötések (mint egy kémiai reakció során), és

3) az ET olyan gyors, hogy a reakcióban szereplő atomoknak vagy molekuláknak, illetve ezek környe-

zetében levő molekuláknak minden alkotórésze „mozdulatlan” marad (lásd Born–Oppenheimer-közelítés, Frank–Condon-elv).

Ennek következtében a reakció előtt a környezettel egyensúlyi állapotban lévő reakciópartnerek a reakció lezajlása után már nincsenek egyensúlyi állapotban a környezetükkel. Ez különösen igaz a reakció előtti és utáni polarizációs állapotokra. Minél nagyobb a környezet polarizálhatósága, annál jelentősebb ez a különbség. Míg tehát a kémiai reakciók klasszikus leírás-módjában a reakció lezajlása alatt a partnerek mindig kvázisztatikus egyensúlyban vannak a környezetükkel, addig az ET-reakciók esetében ez nem áll fenn. Ezek alapján megérthetjük, hogy a „klasszikus” kémiai reakciók értelmezésére kidolgozott és leggyakrabban használt, úgynevezett „átmeneti-komplex elmélet” („transition state theory” = TST) nem tudta megfelelően leírni és értelmezni az elektrontranszferrel járó reakciókat.

Az elemi részecskék – a duális „részecske-hullám” természetüknél fogva, illetve a Heisenberg-féle határozatlansági reláció következtében – rendelkeznek azzal a tulajdonsággal, hogy véges valószínűséggel képesek olyan helyen is tartózkodni, ahol a klasszikus fizika törvényei szerint nem lehetnének. Az (1) egyenlet éppen az ezzel a jelenséggel kapcsolatos alagúteffektus matematikai megfogalmazása. Egy elektron eljuthat az a állapotból a b állapotba még akkor is, ha átlagos kinetikus energiája nem elegendő a két állapot közötti energiagát leküzdésére. Például elektronok esetében mikroszekundumonként bekövetkezik egy ilyen jelenség, ha a leküzdendő négy-szög-potenciálgát magassága ~ 1 eV, szélessége pedig ~ 20 Å. Jól látható, hogy az (1) egyenlet nem tartalmazza a hőmérsékletet. Az alagúteffektussal történő ET egyik tulajdonsága tehát éppen az, hogy a hőmérséklettől független. Nos, éppen ilyen kísérleti eredmények szolgáltatták az 1960–1970-es években az első bizonyítékokat arra, hogy a fehérjékben az elektron kvantummechanikai alagúteffektus segítségével képes mozogni. A folyamatoknál „mért” közel nulla aktivációs energiák pedig még jobban hangsúlyozták a jelenség alagúteffektus-jellegét.

Mielőtt továbblépnénk, általánosítanunk kell a „kvantummechanikai alagúteffektus” fogalmát molekulákra. Bár a fehérjék esetében a redox reakció során lényegében az elektron mozgását észleljük és mérjük (pl. optikai spektroszkópiával), a valóságban – és az elméleti leírás szempontjából – azonban az elektron egy molekuláris pályán tartózkodik, és így nem „csak” az elektron, hanem az egész molekula (atomok halmaza) részt vesz a folyamatban. A kiinduló állapotban az elektron a redukált redox centrumhoz tartozik, a végállapotban pedig ez a centrum oxidált állapotba kerül, az eredetileg oxidált állapotú centrum pedig redukált állapotba kerül. A tapasztalat szerint az ilyen biológiai redox folyamatban az ET megtörténéséhez szükséges energetikai állapot elérésében jelentős szerepet kapnak a molekulán belüli rezgések, és ezek csatolódása a folyamathoz. Azt

mondhatjuk, hogy az egész molekula azon ügyködik, hogy a redukált redox centrumban lévő elektron átjuthasson az oxidált redox centrumba. Az egész molekula lüktet, pulzál, „lélegzik”, és ezek a szerkezeti fluktuációk hozzájárulnak ahhoz, hogy részint a két redox centrum közötti távolság, részint a potenciálgát magassága oly módon változzon, hogy az ET valószínűsége növekedjen. Ha tehát az egész molekulát tekintjük egységnek, akkor az ET-reakciók során az egész molekula „hajtja végre” a kvantummechanikai alagúteffektust. Ez a szemléletmód nagy segítség volt más enzimek reakciók kvantummechanikai alapokon történő sikeres értelmezésében (lásd pl. hidrogénatom-transzfer alagúteffektussal).

A fehérjedinamika feltételezett fontossága nem csak az ET-reakciók értelmezése kapcsán merült fel az enzimek reakció-kinetikájában [7]. Egy kémiai reakció sebességi állandója (k) a klasszikus, Arrhenius-féle megfogalmazásban (amelyet gázfázisú reakciók értelmezésére dolgoztak ki a 19. század végén) a következő egyszerű exponenciális összefüggés szerint függ a hőmérséklettől (T) és az aktivációs energiától (E_a):

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (2)$$

ahol A egy úgynevezett preexponenciális faktor, amelynek dimenziója megegyezik k dimenziójával. Elsőrendű reakciók esetében ez s^{-1} , azaz frekvencia dimenziójú, ezért frekvenciafaktornak, vagy „a reakció próbálkozási frekvenciájának” is nevezik. Éppen ezen a preexponenciális faktoron keresztül az enzimek „lélegzését”, illetve a környezet dinamikus voltát már a 20. század közepén megpróbálták beépíteni a reakciókinetikai egyenletekbe. A klasszikus „átmeneti-komplex elmélet” szerint is a reakció során létrejött enzim:szubsztrát komplexnek valamilyen úton ΔU energiátöbbletre kell szert tennie ahhoz, hogy leküzdhesse azt a potenciálgátat, amely elválasztja az enzimek reakció végállapotától. A H.A. Kramers által javasolt

$$k = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{\Delta U}{k_B T}\right) \quad (3)$$

egyenletben a preexponenciális faktorban szereplő τ a fehérjeszerkezet fluktuációs időállandója, a ΔU pedig a reakció által legyőzendő potenciális energiagát nagysága. Míg az Arrhenius-féle kifejezésben E_a nem tartalmaz az enzimek reakcióra jellemző dinamikus elemeket, addig a Kramers-féle kifejezésben ΔU már tartalmaz. Így tehát a (3) egyenletet tekinthetjük a fehérjékben lezajló ET (redox) reakciók kiindulópontjának. Láttuk, hogy az ET reakciósebességét (k_{ET}) leíró egyenletben meg kell jelennie olyan kifejezésnek, amely az ET lépését követő fehérjerelaxációs folyamatokat értelmezi, és amely elválna az ennél nagyságrendekkel gyorsabban lejátszódó ET lépését leíró tagtól. Ennek legáltalánosabb megfogalmazása – az (1) egyenlet szellemében – a következő formában adható meg:

$$k_{ET}(R_{DA}) = \frac{2\pi}{\hbar} |H_{DA}(R_{DA})|^2 (\text{M.F.}\{R_{DA}\}), \quad (4)$$

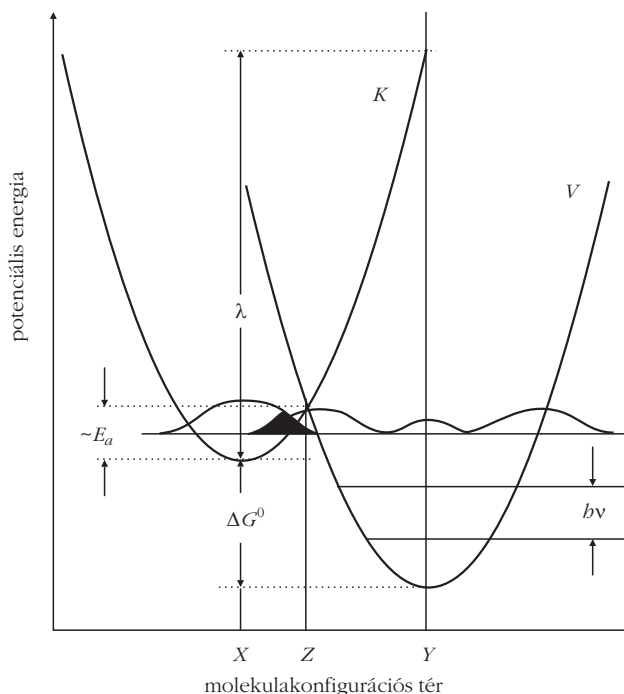
ahol $|H_{DA}(R_{DA})|$ az ET pillanatában a donor- és akceptor-állapotok közötti elektronikus csatolás mértékét megadó tényező, $M.F.\{R_{DA}\}$ a „molekulafaktor”, ami a teljes molekula szerkezeti átrendeződését leíró tényező, és mindkét mennyiség függ a donor-akceptor távolságtól, R_{DA} -tól.

Hogyan mozog az elektron fehérjékben?

1992-ben a kanadai születésű amerikai kémikus, *Rudolph A. Marcus* Nobel-díjat kapott az elektrokémiai reakciók értelmezésére – az 1950–1960-as években kidolgozott – ET-elméletéért [8], amely lényegében azóta is a külsőszférás ET-reakciók legelfogadottabb és leggyakrabban használt elmélete. A Marcus-elmélet félklasszikus változata szerint rögzített (és nem túl nagy) donor-akceptor távolság mellett az ET sebességi állandója (k_{ET}) függ a reakció hajtóerejétől (a reakció során létrejövő szabadenergia változástól: ΔG^0), a molekula, illetve környezetének relaxációjához tartozó reorganizációs energiától (λ), a donor- és az akceptorállapotok közötti elektronikus csatoltságot megadó Hamilton-mátrixtól (H_{DA}) [9]:

$$k_{ET} = \frac{2\pi}{\hbar} |H_{Dd}|^2 \frac{\exp\left[-\frac{(\Delta G^0 + \lambda)^2}{2\lambda \hbar \omega \coth\left(\frac{\hbar \omega}{2k_B T}\right)}\right]}{\sqrt{2\pi \lambda \hbar \omega \coth\left(\frac{\hbar \omega}{2k_B T}\right)}}, \quad (5)$$

ahol $\hbar\omega$ az ET-lépéshez kapcsolt molekulamozgás (reorganizáció) karakterisztikus frekvenciájához tartozó energia. Marcus szerint a kiindulási állapotot (amikor a donor redox centrum redukált, az akceptor redox centrum oxidált) és a végállapotot is (amikor a donor redox centrum oxidált és az akceptor redox centrum redukált) egy-egy parabolikus potenciálfelülettel lehet jellemezni (1. ábra) egy olyan $N+1$ dimenziós potenciáltérben, ahol N a molekulát alkotó atomi koordináták száma (a $+1$ a potenciális energia). A K parabola minimuma (X pont) felel meg az egyensúlyi geometriai állapotnak a redox reakció előtt ($kiindulási$ állapot), a V parabola minimuma (Y pont) pedig az egyensúlyi geometriai állapotnak a redox reakció lezajlása után ($végállapot$). A két minimum közötti potenciálisenergia-különbség a redox reakció szabadenergia-változásával egyenlő (ΔG^0). A reorganizációs energia (λ) annak az energiának felel meg, amelyet a kezdeti egyensúlyi állapothoz kell hozzáadni ahhoz, hogy a kiinduló állapotot olyan geometriai helyzetbe vigyük, amely megfelel a végállapot egyensúlyi geometriai állapotának anélkül, hogy az ET-reakció lezajlott volna. Az ET a két parabola metszéspontját jellemző Z állapot környezetében jöhet létre.



1. *Ábra.* A Marcus-elmélet szerint egy ET-reakció során a kiindulási állapotot és a végállapotot egy-egy parabolikus potenciálfelülettel lehet jellemezni (K és V parabola) egy olyan $N+1$ dimenziós potenciálterben, ahol N megegyezik a molekulát alkotó atomi koordináták számával (a +1 a potenciális energia). X : az egyensúlyi geometriai állapotnak megfelelő N -dimenziós pont a redox reakció előtt. Y : az egyensúlyi geometriai állapotnak megfelelő N -dimenziós pont a redox reakció lezajlása után. ΔG^0 : a szabadenergia változása a reakció során. λ : reorganizációs energia. Az ET a két parabola metszéspontját jellemző Z állapot környezetében jöhet létre. Minthogy az atomi állapotok kvantáltak (erre utal a bV energiakülönbség két energianívó között), ezeket harmonikus oszcillátorokhoz tartozó hullámfüggvényekkel reprezentálhatjuk. Az alágúteffektus valószínűsége a besatírozott területtel arányos. $\sim E_a$ az Arrhenius-féle aktivációs energiához hasonló energiakülönbség.

A Marcus-elmélettel jól lehet magyarázni a rögzített és nem túl nagy távolságokra történő ET-átmeneteket. A reakciósebességi állandó kifejezésében láthatóan megjelennek az egész molekulára jellemző vibrációs energiatagok (a λ és $\hbar\omega$ tagokon keresztül). A félklasszikus (Marcus–Hopfield) elmélet kvantummechanikai magyarázatánál (amelyben a molekulamozgásokat harmonikus oszcillátorokkal jellemezzük) a molekulamozgásokat jellemző karakterisztikus frekvencia mindazon molekulamozgásokat jellemző frekvenciák súlyozott átlaga lesz, amelyek valamilyen szinten hozzájárulnak az ET-reakció végbemeneteléhez. Látható, hogy ha $\hbar\omega \gg k_B T$, akkor $\coth(x) \rightarrow 1$, és k_{ET} alig függ a hőmérséklettől, ami teljes összhangban van a már említett kísérleti eredményekkel.

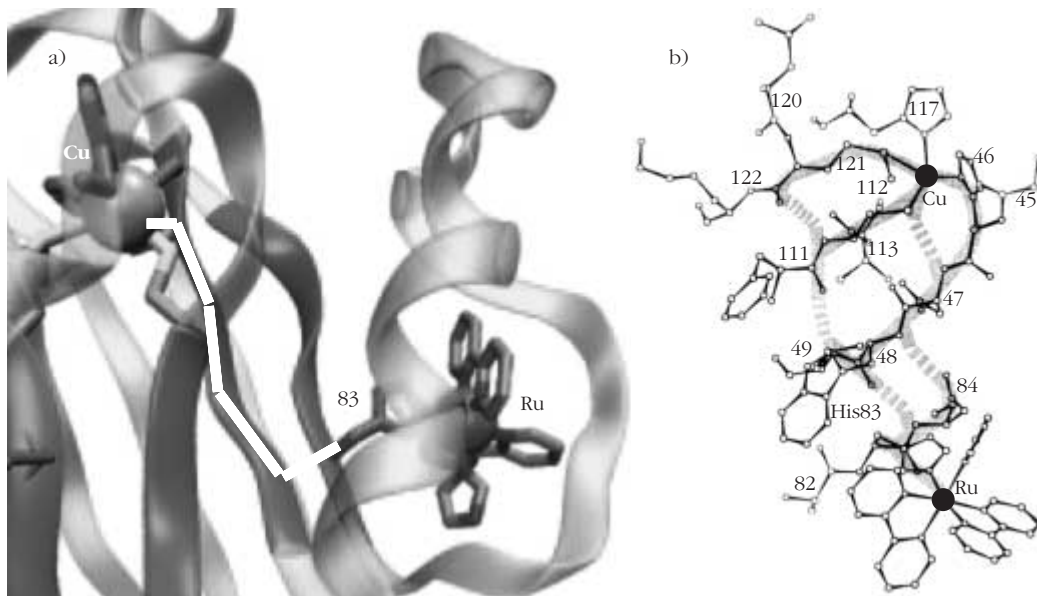
A kezdeti állapotot és a végállapotot jellemző K és V parabolák metszéspontjának megfelelő geometriai környezetben lezajló ET-reakciót azonban változatlanul a $|H_{ab}|^2$ kifejezés uralja. Ez azt jelenti, hogy az ET-reakcióban a donor és akceptor centrumok között az alagúteffekttussal lezajló ET csak nem túl nagy távolságon belül tud reális valószínűséggel megvalósulni. Hiába kerül ugyanis a molekula megfelelő geometriai állapotba (*1. ábra*, Z állapot), ha a kvantumme-

chanikai ET-lépés megtörténésének valószínűsége túl kicsi ehhez (nem-adiabatikus folyamat). Fehérjéken és szerves modellvegyületeken végzett ET-kísérletek eredményei abba az irányba mutattak, hogy az ET-reakcióknak a donor-akceptor távolságtól (R_{DA}) való függése nagyon jól leírható a

$$k_{ET}(R_{DA}) = \frac{2\pi}{\hbar} \frac{|H_{DA}(R_{DA}^0)|^2 (\text{M.F.}\{R_{DA}\})}{\exp\left[\beta(R_{DA} - R_{DA}^0)\right]} \quad (6)$$

egyenlettel, amelyben a β értéke $0,6 \text{ \AA}^{-1}$ és $1,7 \text{ \AA}^{-1}$ közöttinek adódott. Ezek az értékek átfogták azt az intervallumot, amelyben az üvegszerű anyagokra ($1,6 \text{ \AA}^{-1}$), a fehérjék β -redős szerkezetére ($1,37 \text{ \AA}^{-1}$), a fagyott szerves oldószerekre ($1,2 \text{ \AA}^{-1}$), illetve a kovalens kötésekre ($0,7 \text{ \AA}^{-1}$) kapott β értékek találhatók, és jóval alatta maradtak a fehérjék α -hélix szerkezetére kiszámított ($2,7 \text{ \AA}^{-1}$), illetve a vákuumra jellemző ($3\text{--}5 \text{ \AA}^{-1}$) β értékeknél [10]. Figyelembe véve azt, hogy (1) az $10 \text{ \AA}$ -nál nagyobb donor-akceptor távolságok esetén az elektronikus csatolás mértéke már elenyészően kicsi, de (2) kísérleti eredmények szerint $20\text{--}25 \text{ \AA}$ távolságban elhelyezkedő donor-akceptor párok esetében is tapasztalunk ET-reakciót, és (3) látva a mérésekkel kapott β értékek jelentős szórását, egyértelművé vált, hogy a fehérjék belseje nem tekinthető egy homogén és izotróp közegnek az ET mechanizmusának leírása szempontjából. Ismét csak a szerkezeti sajátosságokból kiindulva sikerült megmutatni, hogy a donor- és akceptorcentrumok közötti ET nem egyetlen, széles potenciálgátnak a két centrumot össze-

2. *ábra.* Az azurin molekula egy részletének szalagmodellje (a), illetve golyó-pálcika modellje (a) – a hidrogének nélkül – az aktív centrummal (Cu-ion) és a His83 aminosavhoz kovalensen kötött Ru-komplexszel [Ru(bi-pirimidin)₂-imidazol]. A két redox centrum közötti geometriai távolság $\sim 17 \text{ \AA}$. A redukált Cu-ról a szürke satírozott útvonalakon keresztül juthat el az elektron az oxidált Ru-ra. A szaggatott szakaszok felelnek meg a hidrogénkötések menti, a folytonos szakaszok a kovalens kötések menti ET-lépéseknek. A vélhetően leggyorsabb útvonal a Cu-tól a 46(His)-47(Asn)-48(Tyr)-83(His) aminosavakon keresztül halad a Ru-ig (b), mivel ez az útvonal csak egy H-kötésen keresztül ET-lépést tartalmaz. Az (a) ábrán ennek az útvonalnak az első lépése takarásban van a (Cu mögött helyezkedik el a His46 aminosav), az útvonal további részét pedig szürke vonal jelöli. A molekula folytonos fluktuációja miatt azonban a többi, alternatív útvonal is szóba jöhet a számítások szerint [11, 12].



kötő egyenes mentén történő leküzdésével képzelhető el, hanem a molekulát alkotó és összetartó – kovalens, hidrogén- és van der Waals – kötések mentén, azaz több, egymás utáni ET-lépés eredményeként. Az elektronikus csatolást leíró H_{DA} így szétbomlik elemi ET-lépések szorzatára,

$$H_{AB} = \prod_k \epsilon_K(k) \prod_b \epsilon_H(b) \prod_u \epsilon_U(u), \quad (7)$$

ahol $\epsilon_K(k)$, $\epsilon_H(b)$, $\epsilon_U(u)$ a kovalens kötések menti, a hidrogén kötések menti, és „ugrások” menti ET-lépések elektronikus csatolását írja le, k , b , u pedig ezen csatolások számát jelöli. A fehérjék fluktuációja miatt a donor- és akceptorcentrumok közötti optimális ET-útvonal pillanatról pillanatra változhat; egymáshoz nagyon közel elhelyezkedő, alternatív útvonalak kerülhetnek pillanatról pillanatra „használatba”. Ezek az egymáshoz közeli útvonalak mintegy kijelölnek egy „csatornát”, amelyen belül az ET lezajlik (2. *ábra*). Érezzük és látható is, hogy a valószínűségi ET-útvonal mindig hosszabb a két redox centrum közötti geometriai távolságnál. Két különböző szerkezettel, de azonos donor-akceptor távolsággal rendelkező fehérje esetén csak véletlen lehet az, hogy a donor és akceptor közötti ET sebességi állandója (k_{ET}) és/vagy annak távolságfüggésére (β) ugyanazokat az értékeket kapjuk, hiszen ezek az értékek függenek az elemi ET-lépések számától és azok milyenségétől is. Egy kötések nélküli, térbeli ET-lépés (hopping) nagy mértékben (nagyságrendekkel) lecsökkentheti az ET sebességét, míg a kovalens kötések mentén létrejött ET-lépések száma jelentősen növeli azt. Bebizonyosodott, hogy az aromás oldalláncoknak

sincs kiemelt szerepe a fehérjén belüli ET-folyamatban, mint ahogyan azt a 20. század 60-as éveiben gondolták. Ugyanakkor felértékelődött a hidrogénkötések szerepe és jelentősége a fehérjék szerkezetében, hiszen ezek jelentős szerepet kaptak a molekulán belüli ET-folyamatokban.

Szent-Györgyi Albertnek igaza volt, a fehérjék elektronvezető molekulák. A biokémia és a molekuláris biológia, valamint a számítástechnika fejlődése lehetővé tette azt, hogy megértjük és matemati-

kai eszközök segítségével le is írhatjuk a fehérjék elektronvezetési mechanizmusát. A mai elképzelésünk szerint mind a fehérjéken belül, mind a fehérjék között az elektron különböző erősségű és fajtájú kémiai kötések mentén mozog. Mozgását jelentős mértékben meghatározza (segíti) a fehérje szerkezete és fluktuációja. A fehérjén belüli és fehérjék közötti elektronmozgás minimális energiavesztéssel jár. A fehérjék elektronvezetési mechanizmusa nagyon jól mutatja, milyen takarékosan bánt a természet a fotoszintézis során megszerzett energiával.

Összefoglalás

„A fehérjék, bizonyos körülmények között, elektromosan vezetők lehetnek.” – állította Szent-Györgyi Albert már 1941-ben. A fehérjék elektronvezetési mechanizmusát azonban csak napjainkban sikerül teljes mélységében megértenünk és leírunk. A leírásban fontos szerepet kapnak (1) a fehérjék szerkezeti (másodlagos és harmadlagos szerkezeti) sajátosságai, (2) a fehérje állandó, „pulzáló” mozgását jellemző rezgések, és (3) az a tény, hogy az elektrontranszfer (ET) lépést időben követi egy lassúbb, az egész molekulára kiterjedő „átrendeződési” lépés, amelynek eredményeként a fehérje ismét dinamikus egyensúlyba kerül a környezetével. A kísérletek és elméleti megfontolások tanulsága szerint a fehérjékben az elektronok a különböző erősségű és

jellegű kémiai kötések mentén mozognak a kvantummechanikából ismert „alagúteffektus” (tunneling) és „töltésugrás” (hopping) segítségével.

Irodalom

1. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1937/: „...for his discoveries in connection with the biological combustion processes, with special reference to vitamin C and the catalysis of fumaric acid...”
2. Szent-Györgyi A.: *Bioelectronics: A Study on Cellular Regulation, Defense and Cancer*. Academic Press, New York, 1968.
3. Szent-Györgyi A.: *Válogatott Tanulmányok*. (szerk. Elődi Pál), Gondolat Kiadó, Budapest, 1983.
4. Ladik J.: *Kvantumkémia*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
5. Rácz Z.: Fizika a kémiában. *Fizikai Szemle* 46 (1996) 93–94.
6. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/fermi.html>
7. Somogyi B., Welch G.R., Damjanovich S.: The dynamic basis of energy transduction in enzymes – *Biochim. Biophys. Acta* 768 (1984) 81–112.
8. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1992/marcus-lecture.pdf
9. Moser C.C., Dutton P.L.: Outline of theory of protein electron transfer. In: *Protein Electron Transfer* (ed. D.S. Bendall), BIOS Sci. Publ., Oxford, UK, 1996. 1–21.
10. Gray H.B., Winkler J.R.: Electron tunneling through proteins. *Quart. Rev. Biophys.* 36 (2003) 341–372.
11. Skourtis S.S., Balabin I.A., Kawatsu, T., Beratan D.N.: Protein dynamics and electron transfer: Electronic decoherence and non-Condon effects. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102 (2005) 3552–3557.
12. Curry W.B., Grabe M.D., Kurnikov I.V., Skourtis S.S., Beratan D.N., Regan J.J., Aquino A.J.A., Beroza P., Onuchic J.N.: Pathways, pathway tubes, pathway docking, and propagation in electron transfer proteins. *J. Bioenerg. Biomemb.* 27 (1995) 285–293.

A KOLLEKTÍV ELŐKÉSZÍTÉS, AZ OKTATÁS, A TUDOMÁNY ÉS A TECHNOLÓGIAFEJLESZTÉS SZEREPE AZ ENERGIAPOLITIKÁKBAN

Szergényi István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Az energia szó (ενεργεια) az ógörögben „isteni tett”-et vagy „bűvös cselekedet”-et jelentett, *Arisztotelész* később „ténykedés, művelés, megvalósultság” értelemben használta. Mára azonban már messze vagyunk attól, hogy az energia szót csak a klasszikus, filozófiai értelemben használnánk. Az a mai élet nélkülözhetetlen, gyakorlati feltétele, de lehet háborúk okozója, sőt a kimenetelüket eldöntő tényező is. Rendelkezésre állását egyre inkább csak átgondolt energiapolitika segítségével lehet biztosítani. De milyen is legyen az? Az alábbiakban a szerző több szervezet és energetikai szakértő véleményét, továbbá saját tapasztalatait összevetve és integrálva adja közre a témával kapcsolatos véleményét, némely vonatkozásban három Nobel-díjas gondolatával is nyomatékosítva.

Szergényi István PhD, a BME tiszteletbeli tanára, az Egyesült Nemzetek Szervezete Európai Gazdasági Bizottsága (ENSZ EGB) Energia Bizottságának volt elnöke

A világ mind bonyolultabbá válásával párhuzamosan az energiakérdés is egyre összetettebb lett. Ezt alátámasztandó a vele kapcsolatban megfogalmazott számos kíváncsi kérdésből elég csak a legfontosabbakat említeni: egyrészt garantálni kell a jövő biztonságos energiaellátását, másrészt el kell érni az energiafelhasználással is terhelt környezet megkímélését, miközben szem előtt kell tartani a fejlődő országoknak az életszínvonal felzárkóztatására irányuló törekvését. Hogyan biztosítható mindez, amikor a világ tele van konfliktusokkal, és a versengő országok mindegyike keresi a maga javát, amit pedig – ha elég erős – már rendszerint csak mások rovására tud elérni. Egyelőre nem ismert annak a megoldása, hogy miként egyeztethető össze a globalizáció az egyes államok szuverenitásának megőrzésével egy olyan stratégiai szektorban, mint az energetika. Tovább nehezíti a feladat megvalósítását az energiaforrások egyenlőtlen földrajzi eloszlása, nem utolsósorban pedig az, hogy a világ

energetikáját jelenleg legjobban befolyásoló kőolaj vonatkozásában tekintélyes geológusok hangsúlyozzák a termelés tetőzésének közeledtét. Az sem könnyíti meg a tisztánlátást, hogy az olajvagyonok adatai sokszor jelentősen manipuláltak.

Az ember és a természet sokszorosan összetett kapcsolatának változásával folyamatosan módosul a Föld természeti kincseinek az a köre is, amely az ember által felhasználható vagyonnak tekinthető. Vagyis a mindenkori vagyont csak az emberi társadalom fejlődésének egy-egy szakaszában szabad a termelés számára lehetséges nyersanyagként kezelni. Független szakértőkből, főként geológusokból álló szövetségek (ASPO, ODAC¹) felhívják a figyelmet, hogy a véges fosszilis energiahordozó-vagyonból elsőként az energiapolitikákra különösen nagy hatást gyakorló kőolajkészletek fogyatkozása várható, méghozzá a nem túl távoli jövőben, és már most olyan politikát kell folytatni, hogy lehetővé váljon az elkerülhetetlen kimerüléshez való alkalmazkodás. Nyilvánvaló, hogy ha fel is fedezünk újabb lelőhelyeket, azok nem a készletek végességét, legfeljebb volumenük nagyságát befolyásolják, illetve a termelés tetőzésének valamivel későbbre tolódását okozzák. Ezzel kapcsolatban viszont a nagy társaságok és a politikusok egy része azt hangoztatja, hogy ez a pesszimista szakmai vélekedés egyoldalú, és a piaci erők, valamint a technológia fejlődése mindent idejében megoldanak majd. Viszonylag optimista véleményt képvisel a CERA² is, amely társaság 2030-ra teszi az olajtermelés körülbelül két évtizedig tartó tetőzésének a kezdetét, majd azt követő csökkenését, igaz, hogy a nem hagyományos olajok hasznosításával is számol, és figyelmen kívül hagyja ezek kitermelésének környezetkárosító hatásait. Valójában azonban az általa prognosztizált időpont sem túl távoli.

Az emberiség növekvő igényeinek a források végső kihasználásáig történő kielégítése – tetézte azt a környezet egyensúlyának megbomlásával – beláthatatlan következményekkel járhat. E mellett a világ országainak többségében a feszült világgazdasági helyzet miatt máris fokozódik az energiaellátás sebezhetősége. A nukleáris energia programjai számos országban megtorpantak – és a közvélemény meglehetősen széles körű ellenállása miatt ezen nem könnyű változtatni –, bár folytatásuk (a még meglevő problémáinak megoldásával együtt) egyre inkább elkerülhetetlennek látszik. Nem csekély gond továbbá az energetika területén megjelenő terrorizmus veszélyeit elhárítani vagy legalább mérsékelni. További nehézséget okoz a globális felmérés hiánya arra vonatkozóan, hogy a megújuló energiaforrások milyen mértékben és milyen következményeket maguk után vonva tudják majd helyettesíteni a hagyományos energiaforrásokat. Különösen fontos kérdés annak a tisztázása, hogy a biomassza energetikai hasznosításával összefüggésben meddig terjednek

a lehetőségek, figyelembe véve a globális termőföld nagyságát, illetve a világélelmezés biztonságát.

Utalni kell arra a lehetőségre is, hogy amennyiben nem sikerül kellő mennyiségű olcsó helyettesítő üzemanyagot előállítani vagy más technikai megoldást találni, az olajárak növekedése miatt nagy kihívás előtt áll a gépkocsiipar. Ugyanis az üzemanyag-igényes szállítási problémák megoldásának sikerétől hosszabb távon sok függ majd, mert kudarc esetén a *kereskedelmi globalizáció* válsága is beköszönhet, legalábbis bizonyos árukörökben (nagy volumenű élelmiszer-szállítások³, egyéb termékek). Ezekben az esetekben előtérbe kerülhet a relokalizáció, azaz az említett termékcsoportok helyben történő megtermelése. A változások – ha bekövetkeznek – szinte mindenkit érinthetnek. A következményeket (háborúk az energiahordozókért, éhínségek stb.) nehéz előrejelezni.

Ha csupán ezeket a problémákat tekintjük, már akkor sem csoda, hogy az energiapolitikáknak általában nincs egységes szemlélete. Másként értelmezik azt az energiahordozó-vagyonnal rendelkező, valamint az azt nélkülöző országok, és ugyancsak másként a kormányzati tisztviselők, és energetikai társaságokat képviselők és az egyszerű fogyasztó. Természetes, hogy az egymástól eltérő véleményeket az egyes szereplők különböző helyzete befolyásolja. Mégis, milyen lenne az ideális energiapolitika?

Mindenekelőtt célszerű tudatosítani, hogy az energiapolitika a tendenciák felismerését, az irányok kijelölését, a stratégiai feladatokat hivatott meghatározni, és – még ha ezt egyesek hiányolják is – nem vész el a mégoly fontos részletkérdésekben (azok megoldását az egyes részprogramokra hagyja, amelyek beindításához viszont megadja a főbb szempontokat). Az energiapolitikát tehát ne terhelje meg a számok tömkelege, de a legfontosabb adatokat (pl. az importfüggőség, az egy főre jutó felhasználás, az energiahatékonyság stb.) tartalmaznia kell. Ezek a mutatók ugyanis azt a célt szolgálják, hogy az adott ország számára tájékoztatói lehetőséget nyújtsanak a nemzetközi trendekhez való viszonyban és külkapcsolatai építésében. Egy túldefiniált energiapolitika a jövő megfelelő ismeretének hamis benyomását keltheti, amikor is nem várt módon felbukkanó eseményre nem kell számítani. Kiemelt célja az energiapolitikának az, hogy birtokában a felelős szereplők magatartása, döntéseik, valamint – akár váratlan helyzetben is

¹ ASPO: Association for the Study of Peak Oil & Gas; ODAC: Oil Depletion Analysis Centre

² CERA: Cambridge Energy Research Associates

³ A mezőgazdaságban a kőolajszármazékokat felhasználó gépesített talajművelés és a műtrágyázás, valamint a vegyszeres növényvédelem, az öntözés stb. (zöld forradalom) nagymértékben hozzájárult ahhoz, hogy 1950 és 1984 között a világ gabonatermelése 250%-kal, az emberiség lélekszáma pedig 1960 és 2000 között 3 milliárdról 6 milliárdra nőtt. A szektor energiaigényességét jelzi az USA példája: ma az Egyesült Államokban a mezőgazdasági termelés – állattenyésztés – feldolgozás – tartósítás – szállítás – étkező asztalra kerülés láncolata tízszer annyi energiát igényel, mint amennyit az elfogyasztott étel tartalmaz. Ebből csak a szállításra jellemző, hogy az élelmiszer a termelőhelytől a fogyasztóig átlagosan 1600 mérföldet tesz meg. Az adatok további részletezése nélkül is belátható, hogy az energiahiány a világélelmezés szempontjából milyen katasztrofális következményekkel járna.

szükséges – megnyilvánulásuk helyes és megalapozott legyen. Ebből következően nemcsak az ilyen értelemben elkészített energiapolitikára, hanem annak felelős képviselőjére is szükség van.

A jó energiapolitikák megalkotásának feltétele, hogy az emberi társadalmak felé a legkülönbözőbb területeken mutatkozó jövővel kapcsolatos kihívásokból kiválassza az energetikát érintő legfontosabbakat. További feltétel, hogy kijelölje azokat a szempontokat, amelyek az *energiapolitikák állandó elemeként* közösek a különböző lehetséges jövőképekhez vezető forgatókönyvekben (az energiahatékonyság és -takarékoság fokozása, az emberek tájékozódásának elősegítése mindennek szükségességéről, az oktatás, a tudomány és a technológia fejlesztése, a környezet védelme, valamint a nemzetközi együttműködés alakítása, hatékonyságának javítása stb.). A stratégiai tennivalókat ezek nagymértékben befolyásolják. A lehetséges jövőképek felvázolásához a jó energiapolitika figyelembe veszi a független szakértők széles körének ajánlásait, hiszen az energetikus jobbára csak a saját területén tudja hitelesen valószínűsíteni a fejlődést, holott az energiafelhasználást szinte minden befolyásolja. A „végső”⁴ megfogalmazásnak tehát a lehető legkiválóbb szakértők véleményének a lehető legjobb szintézisét kell tartalmaznia.

A sikeres energiapolitikára példaként elsősorban a *de Gaulle*-i felfogás értelmében kifejlesztett francia atomprogramot lehet felhozni, ami Franciaország számára mind a mai napig meglehetősen nagy energetikai függetlenséget biztosít. Szintén különösen bölcs és példamutató energiapolitikai előrelátásnak minősíthető a dán kormányának az az egy-két évtizeddel korábbi elhatározása is, amely milliárd dolláros nagyságrendű összeggel támogatta az energiatakarékosságot. E döntések lehetővé tették, egyrészt, hogy Franciaország – elsősorban nukleáris fejlesztései révén – Európa legstabilabb energiaellátásával rendelkezzen, másrészt, hogy Európában Dánia energiahatékonysága ma a legjobb. Szintén figyelemre méltó előrelátásról tanúskodott az akkor még a világ legnagyobb olajtermelőjének, az Egyesült Államoknak közvetlenül a II. világháború után megtett azon lépése, amit a jaltai konferenciáról hazatérőben *Roosevelt* alapozott meg Szaúd-Arábia királyával történt találkozásánál. Ezen elkötelezte az Egyesült Államokat a mára legnagyobb olajtermelővé vált Szaúd-Arábiával való barátságáról és támogatásáról hosszú távú olajszállítások fejében. Részben ennek következtében az Egyesült Államok – az 1971 óta csökkenő olajtermelése dacára – egyelőre nem szenvedett hiányt (leszámítva az első olajválság alatti öt hónapot) az olajellátásban. A jelenlegi energiapolitikáját azonban már sok kritika éri.

Az első olajválság alatt a világ országai többsége számára súlyos problémát okozott az energiapolitika

hiánya. A 1970-es évek első felében az országok megismerhették az olajbirtokosok kezében levő úgynevezett olajfegyvert, ami rámutatott arra, hogy az olaj mennyire képes befolyásolni egy-egy ország, sőt országcsoporthoz gazdasági és társadalmi helyzetét mind közvetlen, mind pedig közvetett módon.

Bár a gyakorlatban felmerülő igazi energiapolitikai döntések száma nem túl nagy, az azokat megalapozó ismert és váratlanul felbukkanó tényezőké, jelenségeké viszont igen. *Energiapolitikai jelentősége van:*

- az importfüggő országokban/országcsoporthozban a potenciális szállító/tranzitáló országokkal való kapcsolatok alakításának,

- a diverzifikáció értelmezésének (mind a források, mind a szállítási útvonalak szerint). Az energiapolitikus készítse fel a professzionális politikát (természetesen a külpolitikát is), hogy az a nemzetközi tárgyalásokon kellő információval rendelkezzen.

- Ugyancsak energiapolitikai kérdés a villamos energia előállításának mikéntje (nukleáris-fosszilis-megújuló),

- az új energiatermelési távlatok megnyitása érdekében a kutatási-fejlesztési források kellő mértékének biztosítása,

- az energetikai társaságok tulajdonlásának meghatározása,

- a környezet védelme és a helyi energiaforrások/megújulók fokozott hasznosítása.

- Fontos energiapolitikai feladat a hatékonyság növeléséhez és az elengedhetetlen energiatakarékosság javításához szükséges források rendelkezésre bocsátása.

- Azokban az országokban, ahol az energiahatékonyság gyenge, az energiapolitikusoknak kell felhívniuk a figyelmet arra, hogy a gazdaságfejlesztésért felelős politikusok a kis energiaigényű tevékenységek fejlesztésével segítsék a gazdaság növekedését. Ez az energetika, a gazdaság, a külpolitika, a kereskedelem, a közlekedéspolitika/szállítás fejlesztésének együttes kezelését igényli.

- Ugyancsak fontos energiapolitikai feladat az energiatakarékos társadalmi tudat alakítása, és az energetikai fejlesztések terveinek nyilvános kezelése.

Az energiapolitika keretében azt is alaposan vizsgálni szükséges, hogy milyen tényezők befolyásolják a jövő energiafelhasználását.⁵ Ezeket figyelembe véve a jövő bizonytalanságát több lehetséges jövőkép felrajzolásával csupán változatokban és tendenciákkal lehet figyelembe venni. Azonban még a tendenciákat is csak változatokban célszerű prognosztizálni: a politikai helyzet, a gazdasági és technológiai fejlődés, valamint a környezet követelményeinek a függvényében. Amennyiben a tendenciák változnak, legyen mód a közöttük való átmenetre. Tehát az ener-

⁴ Valójában nincs végső megfogalmazás. Az energiapolitikákat a körülmények alakulásától függően folyamatosan „karban kell tartani”. Ebből a szempontból hasznos, ha az országok rendelkeznek egy állandó energiapolitikai tanáccsal.

⁵ Például a népesség növekedése, a természeti erőforrások kimerülése, a technológiai fejlődés előre meg nem jósolható volta, az ivóvízhez és a táplálékhoz való hozzájutás növekvő nehézségei, a környezet szennyezése, a természeti katasztrófák, az anyagi javak egyenlőtlen földrajzi és társadalmi elosztása miatt a társadalmi és a politikai – akár háborúkba is torkolló – feszültségek éleződése.

giapolitika rugalmasságának lehetővé kell tennie a változékony jövőhöz való alkalmazkodást, és arra – amiről a későbbiekben még szólnunk – a társadalmat is alkalmassá kell tennie.

Speciális helyet foglalnak el az energiapolitikából következő egyes programok. Ezek jellegzetes képviselői közé tartoznak azok, amelyek az energiahatékonysággal, illetve az energiával való takarékosággal foglalkoznak. Az energiaigény-prognózisok alternatíváinak becslésére célszerű figyelembe venni az összenergia-hatékonyság javulásának kívánatos ütemét, hiszen az a GDP növekedésénél nagyobb befolyást gyakorol az igényekre. Ráadásul abban összevontan leképeződik a termelési szerkezet változásának, a technológiai fejlődésnek, valamint az energiatakarékoság alakulásának a hatása.

Kormányzati szinten szükséges és célszerű szabályozni az országokon belüli árák alakítását, továbbá megalkotni az egyes, az energetikához kapcsolódó jogszabályokat. A külkereskedelmi árák a keresleti-kínálati viszonyoktól függenek (ezen belül a kínálatot például nagymértékben befolyásolja az első olajválság alatt az embargón túl megismert – az árákat nagymértékben növelő – a már említett *olajfegyver* is). A belső árákat ezen kívül nagymértékben befolyásolja az adópolitika. A jövővel kapcsolatos várható áralakulásokkal kapcsolatban azt is figyelembe kell venni, hogy nemcsak az energiainportra szoruló országoknak, hanem az energiabirtokosoknak is megvannak a saját energiapolitikáik. Ezek minden bizonnyal arra irányulnak, hogy az olajból és a gázból származó bevételeiket a nemzetközi kereskedelmi árákon keresztül minél hosszabb ideig élvezhessék. Ez pedig természetesen növelően hat a világpiaci árakra. A jogszabályalkotásról viszont azt kell tudni, hogy az csupán eszköze az energiapolitikák érvényesítésének, nem pedig maga az energiapolitika. Jelentősége mégis nagy, nélküle az energiakérdés ma már nem kezelhető.

A felsorolt szempontok alapján fel kell vázolni a lehetséges jövőbe vezető alternatív utakat, majd ezeket figyelembe véve célszerű elkészíteni az energetikai fejlesztések előirányzatait. Ezek után belátható, hogy az energiapolitika kialakítása bonyolult, igazi intellektuális művelet, sikere pedig nem annyira az alkotók eredetiségében, mint a mások ismeretei és gondolatai iránti fogékonyságban, azok feldolgozásában, azaz a befogadóképességben, a világban zajló eseményekre való rálátásban rejlik.

Mindezeket túl, *Lester R. Brown*, az Earth Policy Institute (Washington) intézet alapítójára hivatkozva a szerző szerint is indokolt lenne, ha egy – az Energia Világtanács vagy az ENSZ által menedzselte – nemzetközi keretek között kidolgozott (akár globális?) energiapolitika tartalmazná egy új gazdasági alapokon nyugvó, eljövendő világ előkészítését. Azt egy ma még hiányzó úgynevezett vészforgatókönyv („B-terv”) írná le, amelyben a megújuló és a hulladékenergia, valamint az újrahasznosítható anyagok stb. felhasználása dominálna. Sokak szerint ez már a futurológia témakör-

rébe vág, de a váratlan események sokasodása miatt indokolt az előretétekintés. Ennek a cikknek nem célja eme eshetőségek részleteibe bocsátkozni, csupán utalunk *R. Duncannak* és *M. Simmons*nak, a világ egyik legnagyobb energetikai befektetési társasága elnökének ez irányú kiterjedt kutatásaira. Ha az energiapolitikus nem, akkor vajon ki gondol a távolabbi jövő energiaellátását megalapozó mai teendőkre? Ezzel kapcsolatban kell felhívni a figyelmet néhány olyan kérdésre, mint az oktatás, a kutatás és a technológiák fejlesztése. Az előrelátó kormányok részt vállalnak abban a kollektív feladatnak az előkészítésében és végrehajtásában, amelyiknek a fosszilis energiákat felváltó új energiatípusok ipari méretű elterjesztése és a környezeti katasztrófák megelőzése a célja.

Az oktatás, a kutatás és a technológiafejlesztés jelentősége

Az előzőekből is következik, hogy az energiapolitikák megalkotása, egyáltalán a jövő „tervezése” során az emberi tényezőt a tudósok és a tömegember szempontjából egyaránt figyelembe kell venni. A előbbiekkel kapcsolatban meg kell említeni, hogy a technológiai fejlődés előre meg nem jósolható volta miatt a legnagyobb lángelmék jövőre irányuló tudása is fogyatékos. Ezt példázza, hogy 1933-ban az atommag felfedezője, *Rutherford* is annak a nézetnek adott hangot, hogy az atomi folyamatok „nagyon szegényesek és hatástalanok az energia előállítására, és bárki, aki erőforrást keres az atomátalakításban, csak üres szavakat zeng”.⁶ A tudósok időnkénti saját tévedéseikkel maguk is tisztában vannak. Ezt legjobban *Davy* a róla elnevezett bányalámpa és sok más találmány felfedezőjének a véleménye fejezi ki: „felfedezéseim közül a legjelentősebbeket tévedéseim sugallták”. A gyors eredmények esetleges elmaradása tehát nem indokolhatja a tudomány támogatásának megkurtítását, a közvetlen hasznót nem azonnal hozó intézmények felszámolását. A tudomány útja göröngyös, és az eredményekre általában sokat kell várni. A kormányok költségvetéseit készítőknél legalább ennyit tudniuk kellene, és ahol felelős kormányzás van, ott tisztában is vannak ezzel.

⁶ Tévedésével *Rutherford* nem állt egyedül. 1937-ben *Eddington* azt állította a Harvard Egyetem háromszáz éves centenáriumának ünneplésén, hogy „a szubatomi energiának praktikus mértékben való kihasználása utópisztikus álom, és úgy látszik, valószínűen az is marad”. 1938 vége felé pedig még *Einstein* is tévedett, amikor szemléletes képet rajzolt a *The New York Times* tudományos riporterének arról a végtelen kicsi esélyről, hogy valaha feltárjuk az atom energiáját: „Nem csak gyenge céllovók vagyunk, hanem sötétben lövöldözünk madarakra egy olyan vidéken, ahol nagyon kevés madár van.” Néhány hónappal később, 1939 februárjában *Fermi* mondta ugyanannak a riporternek, hogy egy atombomba, még ha elméletileg kivihetőnek is bizonyul, legálább 25–50 évnnyire van. Kétségtelen, hogy ma már inkább van fogalmunk a technológiai fejlődés gyorsulásáról, de a jövőre vonatkozó bizonytalanságok sok más okból kifolyólag mégis megmaradtak. A jövő kellő ismeretének hiánya miatt illúzió volna azt hinni, hogy a tévedések teljességgel kiküszöbölhetők.

Ezek után jogos feltenni a kérdést: mit tud az átlagember? Hiszen viselkedésétől sok függ. Sajnos, sok minden egyéb mellett az energiáról sem eleget. A civilizáció nagy valószínűséggel csak akkor marad fenntartható, ha a széles tömegek, az egész emberi társadalom is képes lesz alkalmazkodni a globális kihívásokhoz. Súlyos hibát követ el az a kormányzat, amelyik ezt figyelmen kívül hagyja, és nem hozza létre, illetve nem tartja fenn mind az egyéni, mind pedig a társadalmi alkalmazkodóképesség kialakításának feltételeit, többek között az igényes közművelődés és közoktatás (továbbá az előbbieket értelmében a kutatás) kellő támogatásának kereteit. Az ebből a szempontból magára hagyott egyén – sodródva, tulajdon természetétől hajtva – óhatatlanul is társadalmi veszély forrása. Ezen pedig az oktatással és a minden szinten történő felvilágosítással lehet és kell is javítani. Ahhoz, hogy az egyes ember ne pazaroljon, azaz ne használjon fel az ésszerűség határait meghaladó mennyiségű energiánál többet, az szükséges, hogy az oktatás ne kizárólag az ismeretközlést, a nevelés pedig ne csupán a gyakorlatias magatartást, hanem az etikai normákat is szolgálja.

A tapasztalatok szerint a gazdag társadalmak számottevő hányada nem tud ellenállni a piaci növekedést mozgató erőknek, így – ha megteheti – enged a túlzott kényelemre és a pazarlásra való hajlamának. Ehhez saját alaptermészetén kívül hozzásegíti az az eluralkodott piaci szemlélet is, amelyik számára jobbra csak a *most* és a közeli jövő az irányadó. Ez a felfogás azonban nem számol a nyersanyagvagyonok végelességével, tehát nélkülözi a jövő generációk iránti felelős gondolkodást. Túlzás nélkül állítható, hogy a válságok elsődlegesen szellemi természetűek, a máris érzékelhető környezeti, és az egyre inkább fenyegető nyersanyagválság pedig jórészt ezek következményei. Sokban egyet lehet érteni a *Britannica Hungarica* azon megfogalmazásával, amely szerint „a piac mindent megold” túlságosan liberális felfogása elavult.⁷ De ezt vallja *Joseph E. Stiglitz* Nobel-díjas is: „Az a régi hiedelem, hogy a szabad piacok mindig növelik a hatékonyságot, egyszerűen téves.” Különösen igaz ez a társadalom számára létfontosságú energetika területén. Az emberi társadalmak életének, civilizációjának fenntarthatósága érdekében ugyanis stabil energiaellátásra van szükség, amit a piac spontaneitása nem feltétlenül képes megalapozni, és ezt a már bekövetkezett blackoutok bizonyítják is.

⁷ Laissez-faire: („hadd menjen a maga útján” – a francia laissez faire, laissez passer mondanásból alakult ki), a gazdasági liberalizmus jelszava. Ennek a gazdaságpolitikának a lényege, hogy az állam csak minimális mértékben avatkozzék be az egyének és a társadalom gazdasági ügyeibe. A kifejezést a 18. század második felében tevékenykedő francia közgazdászoktól származtatják. Az elmélet szerint az egyén azzal teszi a legtöbbet és a legjobbat annak a társadalomnak, melyhez tartozik, ha saját egyéni céljait követi. Az államnak az a dolga, hogy fenntartsa a rendet és a biztonságot, s ne avatkozzék bele az egyén kezdeményezéseibe, melyekkel saját céljai felé tör. Ez a filozófia 1870 táján érte el népszerűsége csúcsát. Ez után az ipari növekedés és a tömegtermelési módszerek bevezetése által okozott drámai változások világossá tették, hogy a laissez-faire elmélet nem alkalmas a korszak új problémáinak orvoslására. Bár az eredeti elképzelés híveinek nagy része új elméletekhez pártolt, a filozófia fő vonalainak még mindig vannak követői.

A szemléletesség kedvéért jegyezzük meg, hogy a világ népessége – hat és félmilliárd ember – ma annyi energiát használ fel az évmilliók alatt a természetben felhalmozódott meg nem újuló energiaforrásból, amennyit – csupán fizikai erejükre támaszkodva a valaha élt összes embernél több, azaz – százmilliárdok⁸ tudnának (távolról sem a mai ember igényeinek megfelelően átalakított formában) előállítani. A legfejlettebb technológiai társadalmak leggazdagabb egyedeinek kényelmét akár 100 „fantom rabszolga” is szolgálhatja, de egy-egy átlagember mögött is 30–40 embererőnek megfelelő természettől elragadott, nagyrészt – az egykor véges mennyiségben keletkezett – fosszilis energia áll. Azt, hogy a természet ilyen mértékű kihasználása mára lehetségessé vált és a civilizáció jelenlegi szintje kialakult, csak a tudomány és a technika, azaz az emberiség által hosszú idő alatt felhalmozott kollektív szellemi energia tette lehetővé. A kőolaj termelésének előbb-utóbb bekövetkező csökkenése miatt azonban ebben a létfontosságú kérdésben meg kell találni a kiegyensúlyozott energiaellátású jövőbe vezető utat. Nyilvánvaló, hogy ez ismét kollektív szellemi erőfeszítést követel, amihez nélkülözhetetlen az oktatás–kutatás–technológiafejlesztés láncolata. A múlttal összevetve azonban azt kell megállapítanunk, hogy ehhez ma már összehasonlíthatatlanul kevesebb idő áll rendelkezésre, hiszen a természet kiuzsorázási folyamata nagymértékben előrehaladt. Ezért fogadjuk el két Nobel-díjas észrevételét: *Szent-Györgyi Albert* írta: „Számos fejezete ellenére a mi oktatásunknak egyetlen tantárgya van: olyan emberek nevelése, akiknek a lábán nem lötyög a felnőtték cipője, és akik képesek egyenesen állni, tekintetüket a szélesebb horizonton hordozva. Ez a feladat – bármely szinten – legfontosabb közintézményünkkel az iskolát, a legfontosabb közéleti személlyé a tanítót teszi. A holnap olyan lesz, amilyen a ma oktatása.” *John D. Bernal* pedig a következőket írta a *Tudomány és történelem* című könyve 2. kiadásához írott előszavában: „Mostantól kezdve sokkal nagyobb erőfeszítést kell tennünk a tudományos és technológiai kutatás, valamint az ilyen irányú oktatás előbbre vitelére, s az új kor előnyeit csak egy új [...], teljesen kiművelődött népesség veheti birtokába és aknázhajta ki. A tudomány túlságosan fontos és túlságosan veszélyes, semhogy kevesekre bízhatnók.”

Csak röviden, címszavakban és a teljesség igénye nélkül villantunk fel néhány irányt, amelyben különböző előrehaladottsági fokon már folyamatban vannak az új távlatokat megnyitó energetikai *kutatások*: a hideg fúzió, a magas hőmérsékletű szupravezetés, a nanotechnológia energetikai alkalmazása. Kiemelten fontos nemzetközi energiapolitikai döntés volt a közelmúltban – az egyelőre ugyan bizonytalan kimenetelű – a fúziós energiatermelés megvalósítására irányuló, több ország együttes részvételével történő kutatás megindítása. Amennyiben az sikeres lesz, az energiagondok nagy részét – a légi közlekedés és a

⁸ *Jean-Noël Biraben* szerint a kezdetektől összesen körülbelül 80 milliárd ember élt a földön. Ebből mintegy 40 milliárd az utóbbi két évezredben, 15 milliárd pedig az utóbbi két században született.

körülbelül 300 ezer terméket előállító petrokémiai ipar kivételével – feltehetően megoldja, hiszen a villamos energia változatos felhasználása a fosszilis energia kiváltására aránylag széles körben megvalósítható. A fúziós energia ipari elterjedésére azonban a fél évszázados múltra visszatekintő kutatás után még szerencsés esetben is legalább ugyanennyi időt kell várni. Minden bizonnyal ez lehet az eddigi legnagyobb jelentőségű és egyben a leghosszabb időtartamú innovációs ciklus. Ez alatt az idő alatt az átállásra fel lehet és kell készíteni a társadalmakat, valamint ki lehet és kell építeni a szükséges infrastruktúrákat.

A kutatásokon túl, a gyakorlati megoldásokhoz közeli *technológiai fejlesztések* száma nagyobb. Ezek közül ugyancsak címszavakban – és a teljesség nélkül – említjük: a „hagyományos” fissziós nukleárisenergia-termelést, a szénhidrogén-termelések különböző új változatait, a GTL- és CTL-technológiákat,⁹ a megújuló energiaforrások hasznosításának seregét (benne kiemelten a napenergiát), a villamosenergia-tárolást, a széndioxid füstgázokból történő kivonását és „eltemetését”, a hidrogén előállítását, tárolását és szállítását, valamint általában a kapcsolódó fejlesztéseket (például a gépkocsiipar és az információs technológia elterjesztését az energetikán belül).

A távlati energiaigényeknek a – kutatási fázisban vagy még abban sem levő új eljárásokkal történő – kielégíthetősége attól függ, hogy miként sikerült a természet egyre jobb megismerésében előrehaladni, illetve mennyire sikerül szaporodó elméleti tudásunkat a gyakorlat szolgálatába állítani. Remélhetően elmondható *Madách Imrével*: „nehany anyag más-más tulajdonokkal felruházva, miket előbb, hogyan nyilatkoznak, nem is sejtettél bennök, most vonzza, űzi, és taszítja egymást [...] Az ember ezt, ha egykor ellesi, vegykonyhájában szintén megteszi.” A költő zseniális vízióját azonban csak akkor van esélye a technológiának valóra váltani, ha megfelelő mértékű anyagi eszközök állnak a tudományos kutatásnak is a rendelkezésére. Ebben az államok felelőssége nélkülözhetetlen.

Néhány megjegyzés az európai és a magyar energiapolitikáról

A 27 tagból álló EU-ban él a világ lakosságának 6%-a, az összes energiefelhasználásból azonban 16–17%-kal részesedik, miközben ennek csak tört részét tudja saját termelésből fedezni. Tehát az *Unió* működését nagymértékben befolyásolja a világ energiapiaca. *Energiapolitikájának* három fő célkitűzése a fenntarthatóság, a versenyképesség és az ellátás biztonságának szavatolása. Különösen ez utóbbival kapcsolatban szükséges ismételt hangsúlyozni, hogy az energia nem lehet csupán üzleti kérdés, mivel az a társadalmak létszükséglete. Ezért is fontos, hogy a tagországok ne váljanak egyoldalúan kiszolgáltatottakká a

beszállítókkal szemben. E tekintetben az EU egyes országai eltérő helyzetben vannak. Számokkal alátámasztható, hogy míg a 15-ök függősége több régió irányába oszlik meg, addig az újonnan csatlakozók többsége meglehetősen egyoldalú függőségben van, és pedig Oroszországtól.

Kérdés, hogy mindegyik tagország képes lesz-e elfogadni a közös célkitűzéseket? Le tud-e számolni néhány tabuval, közöttük a nukleáris opció újbóli mérlegelésével? Ha egy tagállam a célok elérése érdekében nem tanúsít megfelelő magatartást, illetve nem ad helyes választ a globális kihívásokra, annak következményei más tagállamokat is érinthetnek. Ezért van szüksége Európának, mint közösségnek olyan energiapolitikára, amit valamennyi tagállam a magáévá tud tenni, és amihez tartja is magát. Az egyes országoknak azonban tudniuk kell azt is, hogy a jelenlegi alapszerződés szerint az általános alapelvek (az áruk, a tőke, a szolgáltatások és a személyek szabad mozgása) nem vonatkoznak azokra a tagállami jogszabályokra, amelyeket az energiapolitika érvényesítése miatt a közérdek vagy a közbiztonság érdekében fogad el a jogalkotó.

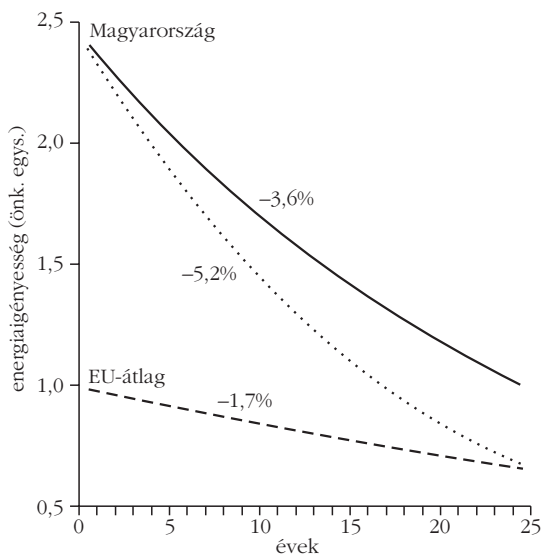
Az uniós energiapolitikának az elmúlt 10 év alatti evolúciója a weben nyomon követhető.¹⁰ Ezért csupán annyit jegyzünk meg, hogy az európai energiapolitikára jellemző a demokratikus megközelítés, aminek keretében az eddigi munkákhoz bármelyik európai polgár hozzáférhet.

A jelen cikk a *magyar energiapolitikával* sem foglalkozik részletesen. Három dolgot azonban indokoltnak tart megemlíteni:

1) *Az 1993-ban az Országgyűlés által elfogadott energiapolitikai anyagban megfogalmazottak több tekintetben sem teljesültek.* Ezek közül ki kell emelni az energetikai vagyoni befolyásolt tulajdonváltásokat. Az eredeti energiapolitika szerint „Az új energiapolitika [...] eleme egyes részterületeken (a kereskedelmi, szolgáltatói üzletágakban) a nemzeti, más üzletágakban pedig az *állami majoritás melletti részleges privatizáció.*” Továbbá: „A helyi önkormányzatok jelentős szerepet vállalhatnak az energiaszektor irányításában és vagyonának tulajdonlásában. A helyi önkormányzatok vagyonrészesevé az energiaszolgáltatásban számottevő lehet: a villamosenergia-szolgáltatásban az aránya 25–35%-ot, a földgázszolgáltatásban még ennél nagyobb is elérhet.” Valamint: „A közszolgáltatási és kereskedelmi tevékenységet végző társaságok (helyi áram- és gázszolgáltatók, tüzelő- és üzemanyag-forgalmazók) többségi vagy kizárólagos önkormányzati tulajdonba is kerülhetnek.” Az 1994. évi kormányváltás után ezzel szemben az Országgyűlés *Az állam tulajdonában lévő vállalkozói vagyon értékesítéséről* című 1995. évi törvénnyel az állami tulajdon piaci alapokon működő magántulajdonba juttatása érdekében lehetővé tette a gáz- és áramszolgáltatók többségi tulajdonának, valamint a MOL-nak, a villamos erőműveknek magánkézbe juttatását az energiapolitikában meghatározott korlátozások nélkül.

⁹ Gázból és szénből történő üzemanyag-előállítás; GTL: Gas to Liquid, CTL: Coal to Liquid

¹⁰ Lásd az irodalomjegyzéket.



1. ábra. A magyar energiaigényesség-változás kívánatos üteme az elkövetkező 25 évben. Az EU energiaigényességének prognosztizált változása -1,7% (szaggatott vonal). Az EU energiaigényessége jelenlegi szintjének eléréséhez szükséges (és az utóbbi évtizedben tartott) 3,6%-os csökkenést mutatja a folytonos vonal. 25 év alatt történő felzárkózáshoz évi 5,2% energiaigényesség-csökkenés lenne szükséges (pontosított vonal).

2) Az energiapolitika csak a gazdaságpolitikával (és amint az az előzőekből kiviláglik a külpolitikával is) összhangban fogalmazható meg. A magyar gazdaság energiaigényessége az EU átlagának a két és félszerese (1. ábra). Ezért versenyképességünk egyik alapvető feltétele a GDP-termelés energiahatékonyságának gyors javítása. Magyarországnak ahhoz, hogy a hatékonyság szempontjából a jelenlegi uniós szintet 2030-ra elérje, az energiaigényesség javításában legalább ugyanazt az (évi 3,6%-os) ütemet kellene fenntartania, amit az utóbbi évtizedben már teljesített, amikor jelentős strukturális változások zajlottak le. Azonban az Unió ugyancsak javuló ütemével elért szinthez (szaggatott vonal) való felzárkózáshoz már évi 5,2%-ra volna szükség (pontosított vonal). Eme kívánatos ütem(ek) teljesülése csak úgy lehetséges, ha a gazdaságpolitikában az energiapolitika a jelenlegi gyakorlattal szemben aktív szerepet kap. Ennek érdekében fel kell hívnia a fi-

gyelmet arra, hogy többé ne engedjünk túkebevonást érvényesülni az energiafaló beruházásokba. Ezzel szemben szorgalmazni kell a gépipari, az informatikai, a (gyógy)turisztikai, a szolgáltatási, a gyógyszeripari, a bio- és nanotechnológiai stb. irányokba történő túkevonást. Az energia- és anyagtakarékosságot, az energia racionális felhasználását a meglévő, illetve a megmaradó energiaigényes (petrolkémiai ipar) kultúrák értéknövelésének maximálását, szellemi erőforrásaink ez irányú latba vetését, az anyagi ösztönzés minden eszközét igénybe kell venni.

3) Végül és nem utolsó sorban fogadjuk el itt is Joseph. E. Stiglitz gondolatát: „Ha egy országban lelassult a gazdasági növekedés, s nő a deficit, akkor sem szabad visszafogni a kutatásra és az infrastruktúra fejlesztésére költött pénzeket.”



Az érdeklődő olvasót az alábbi, bibliográfiászerű irodalomjegyzékkel kívánjuk a téma részleteit érintő további olvasásban segíteni:

- Britannica Hungarica Encyclopedia Britannica. Inc. 2005.
D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens: *The Limits to Growth* (A növekedés korlátai). Universe Books, New York, 1972.
Fodor J.: *A nyersanyagok szerepe az emberiség jövőjében (A kívánt jövőtől a lehetséges jövőig)*. Gondolat, Budapest, 1976.
J.-N. Biraben: L'évolution du nombre des hommes. *Population et Sociétés* n°394, octobre 2003, 1–4.
Jáki Sz.: *The Relevance of Physics*. University Press, Chicago, 1966.
J.D. Bernal: *Science in History*. Watts, London, 1957.
L.R. Brown, az Earth Policy Institute (Washington) intézet alapítója: *Plan b. 2. Rescuing a Planet under Stress and a Civilization in Trouble*.
M. Simmons: *Autopsy of our Energy Crisis*. The Pacific Union Club. San Francisco, California. May 29, 2007.
R. Duncan: *The Olduvai Theory of Industrial Civilization*. <http://www.hubbertpeak.com/duncan/Olduvai.htm>
Szergényi I.: Gondolatok az Európai energiapolitikáról 1–3. *Fizikai Szemle* 49/9 (1999) 325., 50/5 (2000) 145., 51/11 (2001) 347.
Szergényi I.: Az energiafelhasználás-változás a modernizáció függvényében. *Energiagazdálkodás* 1992. febr.
Szergényi I.: A kőolaj és a civilizáció. *Magyar Kémikusok Lapja* 2007. 4.
Chatham House Conference on *The New Politics of Energy, Europe in a Global Context*. 14–15/05/2007
W.I. Beveridge: *The Art of Scientific Investigation*. Norton, New York, 1957.
J.E. Stiglitz: *A globalizáció és visszasságai*. Napvilág Kiadó 2003.
Az európai energiapolitika anyagai a következő webhelyen találhatók: http://europa.eu/pol/ener/index_hu.htm

TUDÓSOK FASORA

Balatonfüred. A város nevét hallva sok minden eszünkbe juthat. A magyar tenger, az egymást érő szállodasorok, a hajózikikötő vitorlásai. A parti sétányról gyönyörű kilátás nyílik a tóra, a panoráma a tihanyi apátság épületével feledhetetlen. De van itt valami más is, amihez hasonló lehet, hogy sehol a világon nem található!

Tegyük egy rövid sétát a sétány melletti parkban, és utazzunk vissza az időben. 1926-ot írunk. 1926. november 1-jén érkezett a balatonfüredi szanatóriumba Rabindranath Tagore, Nobel-díjas hindu költő, hogy

Láng Róbert
Lóczy Lajos Középiskola, Balatonfüred

szívbetegségét itt kezeljék. Felépülése után, hálája jeléül, hársfát ültetett a parkban, amit a későbbiek során több indiai politikus – köztük köztársasági elnökök és miniszterek – követett. Indira Gandhi például 1972-ben, Radzsiv Gandhi pedig 1988-ban ültetett itt fát. Ezeket újabb és újabb fák követték: költők (köztük a Nobel-díjas Salvatore Quasimodo), úrhajósok, politikusok emlékfái. 1956-ban egy indiai küldöttség felavatta Tagore bronzszobrát, és 1957-től a korábban Deák Ferencről elnevezett sétány az ő nevét viseli.



A Nobel-díjas tudósok fasora. (A fényképeket Pápai Márk, a Lóczy Gimnázium 10. évfolyamos diákja készítette.)

Van itt azonban egy kis sétaút, melynek két oldalán szinte egymást érik a fákhhoz tartozó emléktáblák. „Ezt a fát Nobel-díjas fizikus ültette”, „ezt a fát Nobel-díjas fizikus ültette”, és a következőn, meg az azt követő táblán is hasonló felirattal találkozunk.

A két legkorábbi tábla egymás mellett egy 1972. június 13-i faültetésről mesél. Az egyiken *Richard Phillips Feynman* (1918–1988) amerikai fizikus, a másikon *Bruno Pontecorvo* (1913–1993) Lenin-díjas olasz–szovjet fizikus neve olvasható. Mindketten az abban az évben Balatonfüreden tartott *Neutrínó Konferencia* résztvevői voltak. Feynman kvantum-elektrodinamikai munkásságáért 1965-ben kapott megosztott Nobel-díjat, Pontecorvo pedig a neutrínófizika terén alkotott maradandót.

1972-ből még egy táblát találunk. Augusztusban Budapesten nemzetközi atomfizikai konferenciát rendeztek, és ennek volt résztvevője *Ilja Mibajlovics Frank* (1908–1990), aki *Pavel A. Cserenkov* és *Igor J. Tamm* ugyancsak szovjet fizikusokkal együtt 1958-ban vehetett át megosztott Nobel-díjat a Cserenkov-effektus felfedezéséért és értelmezéséért. Ő 1972. augusztus 3-án ültette el emlékfáját.

1976. augusztus 14-én magyar származású fizikus ültetett fát. *Wigner Jenő* (1902–1995), aki 1963-ban kapott megosztott Nobel-díjat „az atommagok és az elemi részecskék elméletének továbbfejlesztéséért, különös tekintettel az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért”.

1977-ben Budapesten rendezték meg az *Európai Részecskefizikai Konferenciát*. A díszvendég az angol *Paul Adrien Maurice Dirac* (1902–1984) volt, aki 1933-ban megosztott Nobel-díjat kapott (*Erwin Schrödinger*rel együtt) „az atomelmélet új, hatékony formáinak felfedezéséért”. Természetesen az ő emlékfája is bekerült a sorba, melyet 1977. július 11-én ültetett el.

Csupán két évet – 1979. június 9-ig – kellett várni a következő emlékfa elültetésére. Ekkor látogatott hazánkba *Alekszandr M. Prohorov*, aki kvantumelektromikai alapkutatási eredményeiért kapott megosztott Nobel-díjat.



Wigner Jenő táblája

1982-ben – immár harmadszor – ülésezett a Neutrínó Bizottság Balatonfüreden, adva volt a lehetőség egy újabb ültetésre. *Rudolf Ludwig Mössbauer* (1929–) „a gamma-sugarak rezonancia-abszorpciójának kutatásáért és ezzel összefüggésben a Mössbauer-effektus felfedezéséért” kapott megosztott Nobel-díjat 1961-ben. A faültetésre 1982. június 15-én került sor.

1986-ban újabb nemzetközi konferenciának adott otthont a Balaton-part: Balatonszéplakon üléseztek a *Nem-kristályos félvezetők '86* konferencia kutatói. Ezen a konferencián vett részt *Sir Nevill Francis Mott* (1905–1996) angol Nobel-díjas fizikus, aki nyolcadiként 1986. szeptember 18-án ültetett fát. Mott két amerikai fizikussal megosztott Nobel-díját 1977-ben vehette át „alapvető elméleti munkájáért a mágneses és rendezetlen szisztémák elektronszerkezetének meghatározása terén”.

1987-ben és 1989-ben két újabb emléktáblával gyarapodott a sétaút. Bár a faültetők egyike sem kapott Nobel-díjat, szakterületükön maradandót alkottak, így joggal kerülhettek ide az emlékfáik. 1987. június 21-én *A világegyetem szerkezete* című, Balatonfüreden tartott fizikuskonferencia egyik résztvevője, *Benoit B. Mandelbrot* (1924–) „francia matematikus, a fraktálok felfedezője” – ahogy az emléktáblán olvashatjuk – ültetett

Tábla P.A.M. Dirac fájánál





Marx Györgyre emlékezik a tábla

fát. 1989. szeptember 10-én pedig Wigner után ismét magyar származású fizikus, *Kürti Miklós* (1908–1999), az alacsony-hőmérsékletű fizika kutatója tisztelte meg Balatonfüredet faültetéssel. Ő is egy balatonfüredi konferenciára érkezett, amit *Energia-alternatívák – kockázat* címmel tartottak.

1991-ben újabb magyar származású fizikus látogatott Budapestre. És bár Nobel-díjat ő sem kapott, a neve mégis mindenki előtt ismert lehet: *Teller Ede* (1908–2003). Teller Ede 1991. szeptember 6-án, a város lakóival és a Lóczy Lajos Gimnázium diákjaival való találkozás után ültette el tiszafáját a sétányon.

1994 kivételes év volt, egyszerre két magyar származású tudós kapott Nobel-díjat. *Harsányi János* (1920–2000) megosztott közgazdaságit „a nem-kooperatív játékok elméletében az egyensúly-analízis terén végzett úttörő munkásságért”, *Oláh György* (1927–) pedig kémiaiit „a karbo-kation kémiához való hozzájárulásáért”. 1995. május 6-án magyarországi látogatójuk részeként mindketten fát ültettek a fasorban.

Daniel Carleton Gajdusek (1923–) amerikai orvoskutató volt a tudósok fasorának következő faültetője. Fő kutatási területe a lassú vírusok csoportja. „A kanyarbetegség okozta kuru betegség leírásáért” 1976-ban megosztott orvosi-életteni Nobel-díjat kapott. Az ültetésre 1998. szeptember 23-án került sor.

A fasor eddigi utolsó, tizenötödik fája 2005. július 7-én került a helyére. Ültetője Balatonfüred németországi testvérvárosának szülötte, *Robert Huber* (1937–) kémiai Nobel-díjas kutató Germeringből. „A fotoszintetikus reakcióközpont háromdimenziós felépítésének meghatározásáért” kapott megosztva Nobel-díjat 1988-ban.

A fasortól kicsit távolabb, szerényen meghúzódva találhatunk azonban még egy táblát. Egy olyan ember emléktábláját, akinek a tudósok fasorának létrejöttét köszönhetjük. Ő, sajnos, már nem ültethetett emlékfát ide, ezt Balatonfüred városa az Eötvös Loránd Tudományegyetem Atomfizika Tanszékének és az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak segítségével 2003-ban pótolta. A táblán pedig csak ennyi áll:

„Marx György (1927–2002) akadémikus emlékére – aki a Nobel-díjasok fasorát létrehozta”...

Irodalom
<http://nobelprize.org>
<http://nobeldijasok.lap.hu>
 Vastagh Gy.: A tudós-emlékfák története (1972–2003). *Füredi História* III. évf. 3. sz.

A FIZIKA TANÍTÁSA

AZ ELTE FIZIKA DOKTORI ISKOLÁJA »A FIZIKA TANÍTÁSA« CÍMMEL PHD-PROGRAMOT INDÍT FIZIKATANÁROK RÉSZÉRE

A fizika tanítása a közoktatásban és a felsőoktatásban egyaránt nehéz helyzetben van. A kiutat kiválóan képzett és szaktárgyuk iránt elkötelezett tanárok képzése jelentheti. A bolognai folyamat részeként a tanári mesterszakokat – a fizikatanárit is – a neveléstudomány szakterülethez sorolták, ezzel a szaktárgyi képzés lehetőségei a korábbiakhoz képest jelentősen szűkülnek. A képzés harmadik szintjét jelentő PhD-képzés – a tanári munkához kapcsolódóan – eddig szintén csak a neveléstudományon belül adott. Ugyanakkor a fizika szaktanárok részéről nagy igény

van a fizika szakterületen, a fizika tanítása témakörben végezhető doktori képzésre és a fizika PhD-fokozat megszerzésére. Az utóbbi évtizedekben a „fizika tanítása” nemzetközileg elismert, a fizikához szorosan kapcsolódó interdiszciplináris tudományterületé fejlődött. A nyugati egyetemek jelentős része a „fizika tanítása” témakörben végzett eredményes doktori tanulmányok és tudományos alkotómunka elismeréseként fizika PhD-címet ad.

A nemzetközi gyakorlattal összhangban az ELTE Fizikus Doktori Iskolája, az országban elsőként, önál-

ló PhD-programot indít fizikatanárok számára *A fizika tanítása* címmel. Az első három éves képzés a 2007–2008-as tanév szeptemberében indult.

Az új képzési forma beindításának háttere és indoklása

Csökkenőben a fizika társadalmi presztízse

A 20. század utolsó évtizedei sajátosan ellentmondásos helyzetet hoztak világszerte, de hangsúlyosan Magyarországon is. A fizika, a többi természettudománnyal és a rájuk épülő alkalmazott tudományokkal (orvostudomány, mérnöki tudományok) korábban soha nem látott robbanásszerű fejlődést produkált, mégis csökkenő e tudományok iránt a társadalmi érdeklődés. Annak ellenére, hogy a tudományra épülő technika mindennapi életünket is egyre jobban meghatározza, a tudományok bizalmi tőkéje megcsappant. Egyre kevesebben vannak, akik legalább alapszinten átfogó képpel rendelkeznek a fizikáról, és világlátásukban, illetve napi gyakorlatukban kognitív szinten használják a fizikában tanultakat.

A fizikától való elfordulás már az iskolában kimutatható. Országos felmérések, úgynevezett attitűdvizsgálatok jelzik, hogy a fiatalok nem kedvelik, értelmetlenül nehéznek, feleslegesnek tartják és ellenszenvvel viseltetnek a fizika tantárgy iránt. Ezzel egybecseng az utóbbi évek országos egyetemi felvételi statisztikája is, a fizikus szak iránti érdeklődés csökken. (Megjegyezzük, hogy a fizika iránti érdeklődés csökkenése és az ebből adódó alulképzettség össztársadalmi szempontból nem a viszonylag szűk fizikus-képzés miatt aggályos, hanem a biztos természettudományi alapozást kívánó műszaki pályák, illetve az orvoscépzés miatt.)

A fizika oktatási nehézségein túl a „felnőtt” társadalom érdeklődése és bizalma is csökken a fizika és általában a természettudományok iránt. Ezt jelzi az értékes tudományos és ismeretterjesztő adások megritkulása a médiában, illetve az áltudományos műsorok – csillagjósolás, távgyógyítás stb. – térhódítása.

Változtatni kell!

Az idézett negatív jelenségek egyértelművé teszik, hogy alapvető problémák vannak a fizika iskolai oktatásában, illetve a tudomány társadalom felé történő kommunikációjában egyaránt. A változtatásra, a negatív trendek megfordítására a fizikus társadalomnak összehangolt tudatos lépéseket kell tenni. Ilyen stratégiai fontosságú feladat az oktatás és a kommunikáció kérdéseiben „hivatalból” érintett fizikatanárok szakmai képzésének szaktudományos igényességű megerősítése. Nyugati egyetemeken ennek már bevezetett módja a „fizika tanítása” (Physics Education) program mint önálló tudományos diszciplína befogadása a fizikus doktori iskolákba. A „fizika tanítása” témakörben végzett eredményes, alkotó kutatómunkát bizo-

nyító jelöltek disszertációjuk megvédése után fizika PhD-fokozatot nyernek.

A következőkben részleteiben is kibontjuk e javaslat indokait, átgondoljuk, milyen aspektusban fogadható el a módszertani kutatómunka a fizika szaktudomány szempontjából értékelhető tudományos tevékenységnek, mi lehet a doktori cím megszerzésének kritériumrendszere. Röviden vázoljuk a nemzetközi gyakorlatot, összevetve a tanári PhD megszerzésének hazai lehetőségével. Végezetül ismertetjük az ELTE Fizikai Intézetében ezzel kapcsolatban elfogadott álláspontot.

A közoktatásban szükség van kiváló felkészültségű, tudós fizikatanárookra

A Nobel-díjasokat nevelő régi híres gimnáziumokat a tudós tanáraik tették kiváló iskolákká. Középiskolában tanító tudós tanárookra ma is szükség van. A színvonalas tanári munka alapja a kiváló szaktudományi felkészültség, és erre épülhet rá a pedagógia. A sorrend nem lényegtelen! Jelenleg, sajnos, a fordított súlyozás a preferált. A háromlépcsős felsőoktatási rendszerben a fizikatanári „mester”-képzés hangsúlya áthelyeződik a pedagógiára. Ez a változás szükségszerűen azt eredményezi, hogy a tanárjelöltek szakmai képzettsége a mai szinthez viszonyítva is csökkenni fog. A magas szintű *szaktanárképzés* jelenleg nincs megoldva. A természettudományi karokon folyó fizika BSc-szintű képzés (a kétszakos tanári szakirány esetén 120 fizika kredit) után a tanári mesterképzés szervezője már nem a fizika szakterület, hanem a pedagógia. (Ezt demonstratívan jelzi, hogy a diploma megjelölése sem MSc, hanem MA!) A mesterképzés 2,5 éves tanulmányi ideje alatt a fizika BSc-vel rendelkező tanárjelöltek oktatására fizikából kevesebb mint 20 kredit jut! A helyzetet súlyosbítja, hogy a bolognai képzési séma harmadik szakasza – fizika szaktudományi vonatkozásban – a fizikatanárok számára hiányzik. Ez azt jelenti, hogy csak neveléstudományból (pedagógiából) van intézményesített lehetősége a tudományos igényű képzésnek és a PhD-fokozat megszerzésének. Bár e doktori képzésben elfogadnak fizika témájú munkákat is, a képzésben gondozója a Pedagógiai és Pszichológiai Kar, ahol természetesen nem a szaktudományi (fizika) szempontokon van a hangsúly. Úgy gondoljuk, hogy a Fizika Doktori Iskola keretében megszervezendő *Fizika tanítása* program megfelelő kurzuskínálata, a szakmailag igényes doktori munka (témavezetői a Fizikai Intézet vezető oktatói) és motivációként az így elnyerhető fizika PhD-fokozat, megfelelő szervezett formát adna a tudós tanárok képzésére.

Az ilyen szakmai képzésre a tanárok körében van igény. A közelmúltban több fizikatanár szerzett fokozatot fizika módszertani témájú munkával neveléstudományból. Többen közülük egyértelműen megfogalmazták, hogy szívesebben dolgoztak volna fizikus doktori iskola keretei közt, és jobban örülnének a „fizika PhD”-nek.

A fizika szakmódszertan felsőfokú oktatói és kutatói utánpótlást igényel

A fizika tanításának tudományos igényű művelése és ennek szaktudományi befogadása a felsőoktatásnak is érdeke. Csak így biztosítható ugyanis, hogy a leendő fizikatanárok szakmódszertani képzése a fizika szempontrendszerét jól képviselje, a szakmódszertan kellően beágyazódjon a szakmai ismeretek közé. Ha a PhD-képzés, illetve a habilitáció lehetősége a fizika szakterületen belül szakmódszertanból nem lehetséges, az a módszertan oktatói utánpótlását veszélyezteti.

A szakmódszertan erősítésének másik fontos indoka a BSc-képzés bevezetésével előálló sajátos helyzet. A nemzetközi tapasztalatok – és az első féléves saját tapasztalatok – azt mutatják, hogy az egyetemre bekerülő diákok középiskolából hozott szakmai ismeretei igen hiányosak. Az új helyzetben az egyetemi oktatás feladatává válik a hiányok pótlása. A BSc bevezető képzésében és a felzárkóztatásban fontos szerepe lehet a fizika tanításának módszertani kérdéseiben jártas oktatóknak.

A fizika tanítása iránt elkötelezett, tudományos igényességgel, magas fokon képzett tanárookra az oktatás-kutatás, közoktatás-fejlesztés területein is szükség van. Az ő hiányukban a tantervek kidolgozásában, fejlesztésében, a tankönyvírásban és az egyre nagyobb szerepet játszó, központosított, standardizált vizsgák anyagában (pl. érettségi) egyre kevésbé érvényesülhetnek a szakmai szempontok.

Fontos területe lenne a fizika tanításában magas fokon képzett szakembereknek a fizika népszerűsítése, a fizika megjelenítése az írott sajtóban és az elektronikus médiában.

A fizika-szakmódszertani alkotómunka elismertsége a nemzetközi gyakorlatban

Az utóbbi évtizedekben a fizika tanítása a fizika területén belül nemzetközileg elismert interdiszciplináris tudománnyá fejlődött, az elismert tudományágak minden jelentős ismervét mutatja:

- Egyértelműen megfogalmazható vizsgálódási területe van, ami szorosan kötődik a fizika tudományához. Alapvető feladata, hogy a fizika eredményesebb, jobb, korszerűbb tanításához dolgozzon ki módszereket, beleértve a közoktatást és a BSc-szintű felsőoktatást is. Az interdiszciplináris tudományterület eredményeit – beleértve a társadalmi érdeklődés így elérhető növekedését és a hatékonyabbá váló iskolai oktatást – közvetlenül a fizika, tágabban az egész társadalom hasznosíthatja.

- A területnek sajátos módszerei vannak (amelyek egyrészt a pedagógiához, másrészt a fizikához kapcsolódnak), melyek megkülönböztetik minden más, a fizikához kapcsolódó diszciplínától.

- Nemzetközi szakmai fórumai, konferenciái, szakfolyóiratai vannak.

- Művelőit nemzetközi szakmai szervezetek tömörítik (pl. GIREP).

- Az IUPAP és az EPS önálló tematikus bizottságokat működtet ezen a területen is.

A nemzetközi gyakorlatban egyre általánosabb, hogy a fizika integrálja a fizikához kapcsolódó interdiszciplináris tudományterületeket, miközben elfogadja azok speciális sajátosságait is. Ilyen speciálisan interdiszciplináris területnek tekinthető, a fizika és a pedagógia vonatkozásában, a fizika tanításának témaköre. Színvonalas európai és amerikai egyetemeken a fizika tanítása – önálló tudományos diszciplínaként – a fizika szakterületbe integrálódik. Például a Bécsi Egyetemen az Elméleti Fizikai Intézet keretében működik szakdidaktikai csoport (<http://www.thp.univie.ac.at/deutsch/research/didactics/diplom.htm>), a német és amerikai egyetemek többségén a fizika szakterületen belül külön tanszéke van a fizika tanításának. (Pl: <http://www.phys.washington.edu/groups/peg/>, <http://didaktik.physik.hu-berlin.de/>). A nyugati egyetemek jelentős részében a fizika PhD-fokozat szakmódszertani kutató munkával is megszerezhető, illetve a fizika tanítása témából – mint fizikából – az egyetemeken habilitálni is lehet. (A fentebb megadott, és a következő ajánlott web-címeken konkrét példák olvashatók PhD- és habilitációs témákra, továbbá a fizika tanítása PhD-hez kapcsolt kurzusokra: <http://www.uni-duisburg.de/FB10/DDPH/home.html>, http://www.colorado.edu/physics/EducationIssues/about/grad_studies.htm, <http://www.ncsu.edu/per/theses.html>, http://web.phys.ksu.edu/info_us/degrees.html#PhysicsD, <http://groups.physics.umn.edu/physed/PhD%20in%20PER/PhDInfo.html>).

(Természetesen a fenti nyugati egyetemeken nemcsak a fizika szakterület, hanem a pedagógia [oktatás-kutatás] is elfogadja doktori témának a fizika szakmódszertani munkákat. A két alternatív lehetőség hangsúlyában és a téma megközelítésének módjában különbözik.)

Mit jelent a fizika szakmódszertani kutatás, és mennyiben feleltethető meg a fizikában szokásos elvárásoknak?

A felvetett kérdésre kimerítő, általános válasz adása helyett – ami már terjedelmi okokból sem lehetséges – néhány „partikuláris” válasszal szeretnénk felelni.

A fizika tanításának problémaköre négy alapkérdés köré csoportosítható: *Mit?*, *Kiknek?*, *Mikor?* és *Hogyan?* tanítsunk. A tudomány és a ráépülő mindennapi technika rohamos fejlődésével e kérdések aktualitása folyamatos. Oktatásunk hatékonysága, sikere attól függ, megtaláljuk-e az optimális válaszokat a kérdésekre. A négy alapkérdés szorosan kapcsolódik egymáshoz. Mindegyik vizsgálható és vizsgálendő is mind a fizika oldaláról, mind pedagógiai-pszichológiai, társadalom-szociológiai szempontból. A jó válasz megtalálása a két oldal kiegyensúlyozottságán, együttműködésén múlik. Nagyon fontos, hogy mindkét oldalon jól felkészült, saját tudományterületükön magasan képzett szakemberek dolgozzanak.

A fizika irányából közelítve a *Mit?* és *Hogyan?* kérdés az alapvető. A *Mikor?* kérdést elsősorban a fejlődéslelektan oldaláról célszerű megközelíteni, a *Kiknek?* kérdésre – ami tulajdonképpen azt takarja, hogy mely iskolatípusban, milyen életpályára készülve, mit és hogyan tanítsunk – a választ a fizikus és a legkülönbözőbb szakemberek együtt tudják megadni.

A mindennapos szak módszertani kutatómunka során a fizika régebbi és újabb fejezeteit, fogalmait, gyakorlati hasznosságát és szemléletformáló szerepét vizsgáljuk. A fizika tanításával kapcsolatos kutatások legizgalmasabb része az a háttér munka, ami a fizika egy-egy újabb területe elemi szintű tárgyalásának kimunkálását jelenti. E munka példáján lehet leginkább érzékelteni a módszertani kutatás és a szaktudományi kutatás hasonlóságát. A szaktudományi kutatásban a legrangosabb munkák közt jegyzik a review-cikkeket. A review írója általában mások eredményeiből építkezik, a részleteket tekintve a cikkben nincs, vagy csak alig van új eredmény, mégis az egész cikk forradalmian új szemléletet, megközelítési módot adhat. A kutatás, a szellemi alkotás, az összefoglalt részeredmények válogatásában, kapcsolataik felismerésében, bemutatásában, új szemlélet kialakításában van. A módszertani kutatásban a fizika új eredményeinek elemi módszerekkel történő bemutatása ehhez hasonló szellemi munka, a szó legelemibb értelmében kutatás, a bemutatás, a megértetés lehetőségeinek kutatása. A módszertani munka során a fizika ismert részeredményeit úgy kell leegyszerűsíteni, hogy a lényeg megmaradjon. Az így leegyszerűsített jelenségeket ezután csoportosítani kell és úgy kapcsolatba hozni, hogy a részek egységes szemléletű, érdekfeszítő, izgalmas egészé álljanak össze. Ilyen szak módszertani alkotómunka mintájának tekinthető például *Károlyházy Frigyes Igaz varázslat* című könyve a kvantummechanika szemléleti alapjairól, vagy *Marx György Életrevaló atomok* című könyve.

Ahogy a jelentős review cikkek mögött kutatói aprómunka adja a hátteret, ugyanúgy a fizika tanításának új útjait kijelölő meghatározó munkák mögé is szükséges a részletek kimunkálása. A részletek szintjén a tartalmi kérdésekhez közvetlenül kapcsolódik a *Hogyan?* kérdésre adható lehetséges válaszok megvizsgálása is. Úgy gondoljuk, hogy amennyiben a részletek kimunkálása egyéni megközelítést, új kapcsolási pontokat, eredeti, új módszereket tartalmaz – kutatási munkának minősül.

Természetesen a módszertani kutató-fejlesztőmunka nem korlátozódik a fizika tematikus fejezeteire, hanem a szokásos tananyag kiegészítését, színesítését is célozhatja. Ilyen témákat kínál a sport, a háztartás, a közlekedés, a környezeti jelenségek stb. Az új témák beemelése az oktatásba fokozhatja a tanulók érdeklődését, és érzékelteheti, hogy a fizika a környezetünkéről, életünkéről szól.

A nagyléptékű tantárgyfejlesztő munkák mellett fontosak a napi gyakorlati munkát könnyítő fejlesztések is. Ahogy a kísérleti szaktudományban tézisértékű eredmény lehet egy új mérési módszer kidolgozása,

vagy egy régebbi eljárás hatékonyabbá tétele, a fizika szak módszertanban egy-egy jelenség hatékonyabb tanítását segítő új kísérlet, demonstráció bevezetése, alkalmas tanulókísérleti eszközkészlet kidolgozása, számítógépes szimulációs program hasonló értékű. Kutatási feladat annak kidolgozása is, hogy miként alkalmazható a leghatékonyabban a számítógép a fizika tanításában. Itt egyaránt fontos a mérőeszközként, szimulációs eszközként, ismerethordozóként való alkalmazás. Fontos fejlesztési feladat a fizikapéldák közelítése a valós problémákhoz, olyan újszerű feladatok kidolgozása, amelyek egyszerűen bemutatható kísérletekhez, jelenségekhez kapcsolhatók, a számítások eredménye kísérletileg közvetlenül igazolható. A módszer hatékonyságát a diákok teljesítményén és a szakfolyóiratok olvasóin lehet mérni.

A társadalmi presztízs visszaszerzéséért az egyes szaktudományoknak érdemes összefogni. A szak módszertani kutatások fontos területe a fizika és más természettudományok kapcsolódási pontjainak felkutatása, közös hasznot hozó oktatásfejlesztési projektek kimunkálása. Ez olyan új, tantárgyközi interdiszciplináris szemlélet kidolgozását jelentheti, amely, kiegészítve a környezettudomány elemeivel, alkalmas lehet széles társadalmi rétegek érdeklődésének felkeltésére is.

A fizika hagyományos kutatási területein egy-egy új eredmény, kidolgozott módszer értékét annak használhatósága igazolja. A szak módszertani kutatásokra ez hasonlóan igaz. A módszertani kutatási-fejlesztési munkához szorosan kapcsolódik a kidolgozott anyag gyakorlati kipróbálása, a munka eredményességét a kipróbálás és annak méréssel alátámasztott eredménye hitelesíti.

Hazai lehetőségek fizikatanárok számára a doktori cím megszerzésére

- Az országban működő fizika doktori iskolák megalakulásuk óta nyitottak a fizikatanár végzettségű fiatalok előtt, ha azok valamely hagyományos fizikai tudományterületen hajlandóak kutatómunkát végezni. Az ELFT adatai szerint 2002–2006 között különböző egyetemeken sikeresen megvédett fizika PhD-munkák száma 170, amiből 25 jut a tanár végzettségűekre. Sajnos a fokozat megszerzése után a fiatalok jellemző többsége nem tanári munkát végez, hanem főhivatású kutató. Ennek okait csak valószínűsíteni tudjuk. Lehetnek köztük olyanok, akiket korábban sem érdekelt a tanári hivatás, és csak szükségből diplomázott tanárként, de az is lehet, hogy a doktori munka során változott meg érdeklődésük. A gyakorlat tehát azt mutatja, hogy ez a képzési forma nem jelent megoldást a gyakorló fizikatanárok emelt szintű szaktárgyi képzése szempontjából.

- A tanárok – így a fizikatanárok is – hazai egyetemeken a Pedagógiai Doktori Iskolákban szerezhettek fokozatot általános pedagógiai és pszichológiai témákból, illetve szak módszertanból. Erről a korábbiakban már szóltunk.

• Elsőként a Debreceni Egyetem Természettudományi Karán működő Fizika Doktori Iskola döntött úgy, hogy lehetővé teszi gyakorló tanárok számára a szakmódszertani témájú PhD-munkát, ha azt az iskola valamelyik programja előzetes mérleglés után befogadja. A fizika tanításának szempontjain alapuló speciális doktori kurzuskínálat nincs. (Ebben áll jelenleg a különbség a debreceni gyakorlat és az ELTE Fizikai Intézeti Tanácsa által elfogadott és megvalósításra előterjesztett modell között.) A fizika szakmódszertanból Debrecenben szerezhető PhD követelményei az egyetem honlapján megtalálhatók.

Végezetül megemlítjük, hogy például Németországban a kiváló tanárok szakmai megkülönböztetésére nem csupán a PhD-cím megszerzése lehetséges, hanem úgynevezett „magister”, mester-tanári cím is. Létezik továbbá a tanácsosi, főtanácsosi, sőt a tiszteletbeli iskolaigazgatói cím is. A közelmúltban hazai elképzelések is megfogalmazódtak a „mester-tanár” cím meghonosításáról. Anélkül, hogy a kérdésben érdemi állásfoglalást tennénk megjegyezzük, hogy a mester-tanári cím bevezetése, illetve erkölcsi és anyagi elismertetése, jogi megalapozása országos oktatáspolitikai akarat, és jelentős anyagi ráfordítás kérdése. A jelenlegi helyzetben ennek nem látjuk realitását. Amennyiben a fizika doktori iskolák saját hatáskörükben nem fogadják be a fizika tanítását, úgy az ambíciózus, tehetséges tanárokat a fizika helyett a pedagógia doktori iskolák felé terelik.

Milyen előnyökkel jár a tanárok számára a tudományos fokozat megszerzése

A többlettudás megszerzésén túl a PhD-fokozat megszerzése anyagi előnyökkel és lehetőségekkel is jár. A tanárok döntő többsége közalkalmazott, így fizetésüket a közalkalmazotti bértábla szerint kapják. Eszerint az egyetemi végzettségű tanárok a „H” fizetési osztályba sorolódnak, a tudományos minősítéssel rendelkezők a „J” osztályba. A két fokozatnyi különbség a havi fizetésben átlagosan 40 000 Ft különbséget jelent. A bér és a különbség is függ a szolgálati időtől: fiatalabb életkorban a különbség 28 000 Ft, idősebb korosztályban 52 000 Ft.

A tudományos fokozattal rendelkezők más előnyöket is élveznek. Külön tanfolyam, illetve vizsga nélkül betölthetik a tanári szakvizsgákhoz kötött beosztásokat (pl. gyakorlóiskolai vezetőtanár, mentortanár, szaktanácsadó stb.), minősítésük alapján kérhetik felvételüket az országos szakértői, továbbá a vizsgáztatói névjegyzékbe is.

A doktori képzés és a kötelező tanártovábbképzés viszonya

Minden pedagógust rendelet kötelezi arra, hogy 7 évente, összesítve legalább 120 órás, akkreditált szakmai továbbképzéseken vegyen részt. Ennek költségeire az iskolák kapnak fedezetet (az utóbbi években ez is csökkenő). Az új doktori képzés megindulásával

egyidejűleg az ELTE Fizikai Intézete tervezi olyan új továbbképző tanfolyamok akkreditálását is, amelyek részleges átfedésben vannak a PhD-programmal. Így a doktori képzés kurzusait akkor is „hasznosíthatja” a tanár, ha valamilyen ok miatt a doktori cselekményig nem jut el. A hasznosítás fordított útja is járható: a vonatkozó tanártovábbképző kurzus elvégzése bizonyos időhatáron belül felvételi előnyt, illetve elfogadott krediteket jelenthetne a doktori képzésben.

Együttműködés a határon túli fizikatanárokkal

A hazai PhD-képzés lehetőséget teremt a környező országok fizikát magyarul tanító tanárainak is a bekapcsolódásra. Ez, ahol arra mód nyílik, történhet kettős témavezetésű formában. Az ELTE és a Babeş-Bolyai Egyetem között például létezik „Kettős-vezetésű Doktori Egyezmény”. Ez mindkét doktori iskola igényeit figyelembe veszi, a két témavezető irányításával lehetővé tesz áthallgatást, és a választott helyszínen történő védés után, mindkét országban elfogadott diplomát ad ki. Az ennek keretében történő részvételre, az előzetes felmérés szerint, van igény az erdélyi tanárok részéről. *Néda Zoltán* egyetemi tanár, az MTA tiszteletbeli tagja (Babeş-Bolyai Egyetem) vállalta, hogy a kolozsvári tevékenységet összefogja és irányítja.

Az ELTE nyitott az együttműködésre más határon túli egyetemekkel is, ahol magyar nyelvű fizika tanárképzés folyik.

„A fizika tanítása” PhD-program tartalma és tervezett gyakorlata

A fizikatanári PhD-képzés deklarált célja

A képzés célja a köz- és a felsőoktatásban tanító fizikatanárok tudományos igényű képzése, és bevezetése a szakmódszertani kutatómunkába. Olyan, a fizika tudományában széleskörűen tájékozott, a szaktudományt és a pedagógiai ismereteket alkotó módon társítani képes szaktanárokat képzése, akik képesek az igényes tanítás, tehetséggondozás, ismeretterjesztés, a tantervkészítés és szaktárgyi fejlesztés, a szaktanácsadói, illetve a vezetőtanári feladatok ellátására, továbbá utánpótlást jelentenek a szakmódszertan területén a felsőoktatásban.

A tanári doktori képzést speciális fizikakurzus-kínálat segíti. A kreditkövetelmények hasonlóak az ELTE Fizika Doktori iskola többi programjához. A doktori munkával szemben követelmény, hogy elsődlegesen a fizika tudományterületéhez kötődjék, témavezetője (külső témavezető esetén intézményi konzulense) a Fizikai Intézet vezető oktatója legyen. Mint a többi, már futó fizika program esetén, itt is elvárás, hogy a doktori munka a nemzetközi összehasonlításban is megállja a helyét.

A program vezetője: *Tél Tamás* egyetemi tanár.

A program szervezője: *Jubász András* docens.

A képzés formája: internetes kapcsolattal segített egyéni képzés (félévente 4–5 konzultációs nappal).

Tandíj: 76 500 Ft /félév (gyakorló tanárok tandíj-költsége *Manbertz Károly* szakállamtitkár állásfoglalása szerint az iskolai továbbképzési keretéből fizethető, illetve támogatható).

Jogviszony: A képzési idő alatt a doktorandusz hallgatói jogviszonyban áll az egyetemmel (pl. diákigazolvány, utazási kedvezmény illeti meg).

A jelentkezés módja: hasonló a Fizikus Doktori Iskola többi programjára jelentkező nappali tagozatos hallgatókéhoz, részletes tájékoztatás az ELTE TTK Doktori Iskola honlapján található.

A jelentkezés elbírálásánál előnyt jelent: korábbi TDK-munka, kiemelkedő tanítási gyakorlat, publikációk, fizikaversenyeken eredményes tanítványok, magas szintű nyelvismeret.

Kreditkövetelmények: Lényegében azonosak a már működő fizika programokéval, azaz összességében 180 kredit, amely 6 félév alatt teljesítendő. Mivel a tanári munka a fizikán belül a lehető legszélesebb spektrumon kíván tájékozottságot és áttekintő ismereteket (a kutató fizikusnál a saját tudományterületének, illetve munkaterületének részletes ismeretén van a hangsúly), javasoljuk, hogy a félévente az elvárt 2 kurzus helyett a tanári PhD-programban az első 4 félévben 3–3 tantárgy, az 5. félévben 2 tárgy szerepeljen. Így a tantárgyanként szokásosan adható 6 kreditet figyelembe véve az úgynevezett képzési kreditek összesített száma $16 \times 6 = 96$ kredit. (A szemeszterenként heti 2 órás tantárgyakkal ekvivalens követelményeknek – a levelező képzési gyakorlat szerint – tömbösítve kellene eleget tenni.) A további 84 kredit a jelölt folyamatos szakmai munkájára adható, eseti mérlegelés alapján, hasonlóan a fizika szakterület többi programjához. Támogatandó, hogy a doktorandusz alkalmi résztvevőként megismerje a fizika valamely szakterületén folyó „klasszikus” kutatás módszereit, az eredmények publikálási folyamatát. Az ilyen dokumentált munkát (publikáció társszerzője) a tanári doktori képzésben a programbizottság kreditpontokkal ismeri el akkor is, ha a publikáció témája nem kapcsolódik a jelölt doktori témájához.

Publikálási követelmények: A szakterületen már alkalmazott gyakorlat szerint az interdiszciplináris területekről a fizika szakterületre befogadott PhD-munkák publikálási kritériumai – éppen a témák interdiszciplináris jellege miatt – eltérő lehet a hagyományos „tisza” fizika kritériumrendszerétől. A fizika szakmódszertan területén végzett tudományos munka is ilyen sajátos eltéréseket kíván.

A fizika doktori iskola programjainak kritériumrendszere a szakmódszertani területen automatikusan nem alkalmazható, mivel ezen a szakterületen alig van jegyzett, impakt-faktorral rendelkező folyóirat. Általában igaz, hogy a fizika tanítása szakterületen a legtöbb publikáció hazai nyelven íródik. A németek döntően német, a franciák francia, az angolok, amerikaiak angol nyelvű folyóiratokban publikálnak, első sorban hazai olvasóknak, tanároknak. A szakmódszertani folyóiratokban a cikkekkel szemben támasztott fokozott nyelvi igényesség jellemző, nem elegendő

dő a korrekt leírás, a megfogalmazás stílusa, a helyi nyelvi fordulatokhoz való illeszkedése is követelmény. Természetesen a világnyelveken megjelenő folyóiratoknak nemzetközi olvasótáborra van, mégis azt mondhatjuk, hogy az igazán nemzetközi fórumok a konferenciák, illetve azok lektorált kiadványkötetei.

PhD-fokozat megadásához szükséges publikálási követelmények

Legalább kettő idegen nyelvű publikáció.

- Közülük legalább egy a disszertáció témájához kapcsolódó, saját szakmai munkán alapuló szakmódszertani cikk publikálása referált munkákat közlő, valamelyik világnyelven megjelenő nemzetközi folyóiratban. (Pl: *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, *Physics Education*, *Physics Teacher*, *Praxis der Naturwissenschaften*, *Physik und Didaktik*, *Fizika v Skole* stb. A lista a programbizottság részéről folyamatosan bővítendő, módosítható.)

- Elfogadható a disszertáció témájához kapcsolódó, saját szakmai munkán alapuló szakmódszertani cikk publikálása referált nemzetközi konferenciakiadványban.

Három magyar nyelvű publikáció.

- Saját szakmai munkán alapuló, referált szakmódszertani cikk elismert hazai folyóiratban (*Fizikai Szemle*, *A fizika tanítása*, *Iskolakultúra*).

- Ismeretterjesztő cikk a fizika valamely aktuális eredményéről (*Fizikai Szemle*, *Természet Világa*, *Élet és Tudomány*, *Műszaki Szemle* [Kolozsvár]).

- Elfogadható (egyéni elbírálás alapján, valamelyik magyar nyelvű publikáció helyett):

- fizika tankönyvek, tankönyvrészletek, jegyzetek, oktatási segédanyagok;
- tanári segédkönyvek, szakdidaktikai segédletek;
- elektronikus oktatási szakanyagok;
- konferencia-kiadványban megjelent cikk;
- ismeretterjesztő műsorok rádióban, tv-ben.

Doktori szigorlat

Főtárgy: A fizika tanítása.

1. melléktárgy: választandó valamely más fizika doktori program tárgyínálátából.

2. melléktárgy: kérhető a „Fizika tanítása program” kurzuslistája alapján, kapcsolódó tantárgyak összevonásával (a választást a programbizottság hagyja jóvá).

Doktori dolgozat és védés

Megegyezik más fizika doktori programok gyakorlatával.

Doktori oklevél

A Kar és a Fizika Doktori Iskola szabályainak megfelelően a tudományág (fizika) mellett a szakterület is megadásra kerül a doktori oklevélben, mely jelen esetben: A fizika tanítása.

Doktori kurzusok (előzetes)

A nemzetközi gyakorlat szerint a doktori kurzusok meghatározó részét a fizika és a fizika tanításának témái adják kiegészítve néhány, a fizika tanítására alkalmazott informatikai és pedagógiai tárggyal.

Fizika szakmódszertan

- A klasszikus fizika tanítása I., II. (felkért előadókkal – szervező Juhász András)
 - A modern fizika tanítása I., II. (felkért előadókkal – szervező Juhász András)
 - A fizika fogalomrendszerének változásai Newtontól a szuperhúrokig (Nagy Károly)
 - A nehezen szemléltethető fizikai fogalmak megközelítése (Károlyházi Frigyes)
 - A számítógépek alkalmazhatósága a fizikaoktatásban (Bérces György)
 - A matematika és fizika speciális kereszttantervi kérdései
 - A tehetséggondozás elméleti és gyakorlati problémái (Rajkóvits Zsuzsanna, Gnädig Péter)
 - A feladatmegoldás módszertana, szerepe a fizika tanításában (Gálfi László, Gnädig Péter, Honyek Gyula, Tasnádi Tamás)
- Fizika az interneten
Mindennapok fizikája (Juhász András, Tasnádi Péter)
A kísérletezés szerepe az iskolában (Juhász András)
Dimenzióanalízis (Rácz Zoltán)
Héjfizika (Gálfi László)

Fizikátörténet

- A fizika története (Nagy Károly)
- A fizika magyarországi története (Radnai Gyula)
- A fizika szemléletformáló nagy kísérletei (Juhász András)

Válogatás a fizika doktori kurzusaiból, a szakterület aktuális és speciális kínálatából, illetve pedagógiai doktori kurzusok közül

- Környezeti áramlások fizikája (Jánosi Imre)
- Fraktálnövekedés (Czirók András)
- Kommunikáció a fizikában (Patkós András)
- Környezetfizika (Kiss Ádám)
- Kaotikus mechanika I., II. (Tél Tamás, Gruiz Márton)

Kitekintés a fizika speciális területeire, illetve a fizika megjelenésére a természettudományokban

- Fizika a biológiában (Derényi Imre, Horváth Gábor)
- A természetvédelem ökológiai alapja (Scheuring István)
- Fizika a kémiában (Riedl Miklós)
- Fizika a környezettudományban (Kiss Ádám)
- Érdekes anyagok – anyagi érdekességek (Juhász András, Tasnádi Péter)

- A csillagászat és az űrkutatás speciális problémái (Forgácsné Dajka Emese)
- A relativitáselmélet alapjai (Hraskó Péter)
- Kooperatív jelenségek, interdiszciplináris vonások (Néda Zoltán)
- A modern részecskefizikai világkép (Horváth Ákos)
- Tudomány és áltudomány (Hraskó Péter)

Alkalmazott pedagógia

- A multimédia általános szerepe és lehetősége az oktatásban, a multimédia alkalmazása a fizika tanításának támogatására (Kárpáti Andrea)
- A távoktatás alkalmazása a fizika és a természettudományok vonatkozásában (Kárpáti Andrea)
- A természettudományok tanítása hagyományos és reformpedagógiai módszerekkel
- A tanulók készség- és tudásszintjének mérése (Csapó Benő)

2007–2008 őszi félévben indított kurzusok

- A klasszikus fizika tanítása I. (szervező: Juhász András)
 - A fizika fogalomrendszerének változásai Newtontól a szuperhúrokig (Nagy Károly)
 - A relativitáselmélet alapjai (Hraskó Péter)
 - Környezeti áramlások fizikája (Jánosi Imre)
- Az előadások nyilvánosak, minden érdeklődő tanárkollégát szívesen látunk! Az előadások időpontja: minden hónap második szombatja délelőtt 9 órától. További információ: juhy@ludens.elte.hu

2007–08 tanévben megkezdett PhD-munkák témái

- Környezetfizika a középiskolában (témavezető: Horváth Ákos)
- A modern fizika eredményei egyszerűen (Néda Zoltán, Tél Tamás)
- Fizikatanítás a természetben (Juhász András)
- Környezeti áramlások (Horváth Viktor)
- Légkörfizikai jelenségek a fizika tanításában (Tasnádi Péter)

További információk

Az ELTE Fizika Doktori Iskola felvételi rendje és általános követelményei, valamint a szükséges adminisztráció <http://teo.elte.hu/phd/news.php> honlapon megtalálható.

A „Fizika tanítása” programról részletesebb információk, témaajánlatok találhatók az ELTE Fizikai Intézet honlapján is. (Minden további kérdésre, amelyet az érdeklődők a tel@general.elte.hu (Tél Tamás), és a juhy@ludens.elte.hu (Juhász András) címre elküldenek, személyes választ adunk.

Úgy gondoljuk, hogy a fizikatanítás problémáinak és a fizika társadalmi kommunikációs nehézségeinek megoldása szempontjából előremutató lépés a tanárképzés szaktudományi megerősítése és a tanárok ezirányú motiválása. Fontos lenne, hogy az ELTE-hez hasonló módon más Fizikus Doktori Iskolák is befogadják a „fizika tanítását”, a speciálisan tanároknak szóló doktori kurzuskínálattal, önálló programként. A különféle doktori iskolák a munka összehangolásával, tapasztalatcserével segíthetnék a közös célok elérését. Természetesen megértjük, ha a program beindítása például létszámok vagy oktatói kapacitás hiánya miatt nem lehetséges, de ez esetben is számíthatnánk a testvérintézmények elvi együttműködésére, támogatására. Örömmel vennénk például, ha más egyetemekről is lennének olyan lelkes kollégák, akik témavezetőként vagy tanári doktori kurzus felajánlásával tevőlegesen is részt vállalnának az ELTE-n beinduló programban, és természetesen mi is szívesen vállalnánk máshol hasonló feladatot.

Az ELTE Fizika Doktori Iskola „Fizika tanítása” programjának szervezői nevében:

Juhász András

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnöksége a Juhász András cikkében leírt doktori program megszűlését már az előkészületek fázisában teljes súlyával támogatta. Ez év tavaszi ülésének jegyzőkönyve ezt dokumentumszerűen is kifejezi:

„Az ELFT Elnöksége, az ügy kiemelkedő társadalmi jelentőségét felismerve, 2007. március 21-i ülésén támogatta, hogy gyakorló tanárok nemzetközi színvonalú és a nemzetközi tudományos kritériumoknak megfelelő formában bemutatott fizikaoktatást fejlesztő kutatásaik és gyakorlati eredményességű alkotásaik alapján, rendszeres doktori tanulmányok egyidejű sikeres elvégzését követően »Fizika PhD« tudományos fokozatot szerezhessenek. Az Elnökség az Oktatási és Kulturális Minisztériumhoz fordul, hogy a levelező doktori tanulmányaikat sikeresen folytató tanárok erre a célra is igénybe vehessék a törvény által biztosított tanárto-vábbképzési támogatást.”

Köszönet és elismerés illeti az OKM-et, amely, az ügy fontosságát felismerve, az önálló program elindítását kormányzati szintű támogatásával lehetővé tette.

ROCARD-JELENTÉS – ELSŐKÉZBŐL

Szilágyi Zsuzsa interjúja Csermely Péterrel, a természettudományos oktatás megújításával foglalkozó EU-s szakértői csoport magyar tagjával

Janez Potocnik, tudományért és kutatásért felelős EU-biztos és *Ján Figel* oktatást, képzést, kultúrát és ifjúsági kérdéseket felügyelő EU-biztos a nyáron kapták kézhez egy szakértői csoport munkáját, mely a természettudományos közoktatás módszertanának radikális megújítását javasolja. A jelentést kidolgozó öt fős szakértői testület tagja volt *Csermely Péter* Descartes-díjas professzor, az MTA doktora is. A bizottság tevékenységéről, a jelentésben megfogalmazott feladatokról és a hazai tennivalókról Csermely Pétert kérdeztük.

– *A nyáron tette közzé összefoglaló jelentését az az uniós szakértői bizottság, amely az EU kutatási és oktatási biztosai számára készített ajánlást a természettudományos oktatás megújításáról. Mi volt a szakértői testület feladata és kik vettek részt a munkában?*

– Az EU szinte minden tagállamában évek óta folyamatosan csökken a felsőoktatás természettudományos és mérnöki szakjaira jelentkezők száma. A végzett hallgatók között aggasztóan alacsony a nők számaránya. Minden EU-s közvélemény-kutatási adat arra utal, hogy az EU polgárai kiemelten fontosnak érzik a

természettudományos és mérnöki tárgyak oktatását az EU jövője szempontjából, de 85%-ban elhibázottnak tartják a jelenlegi oktatási gyakorlat számos elemét. Ha ezeket a folyamatokat nem sikerül megfordítani, az EU nemcsak az USA-hoz és Japánhoz képest marad le a magas szintű szaktudást igénylő ágak fejlesztésében, hanem a végzős hallgatók létszáma a kínai és indiai munkaerő-kínálattal sem fogja tudni felvenni a versenyt – még az EU saját tagállamaiban sem. A legújabb jel, hogy az elmúlt években a vezető ipari cégek sora jelezte mélyszéles aggodalmát az EU-tagországok természettudományos oktatásának állapota miatt, és felajánlották segítségüket a jobbításban. A szakértői testületet az EU tudományos és oktatási biztosai azzal a feladattal bízták meg, hogy keressen lehetséges válaszokat e sürgető kérdések megoldására. A testület vezetésére *Michel Rocard* volt francia miniszterelnököt, európai parlamenti képviselőt kérték fel, tagjai pedig *Doris Jorde* norvég oktatási szakértő, *Dieter Lenzen*, a berlini egyetem rektora, *Harriet Wallberg-Henriksson*, a Karolinska Institut elnökösszonya és jómagam voltunk.

– *Miben látják a természettudományos és műszaki pályák iránti érdeklődés csökkenésének okait?*

– A legfontosabb okokat a bizottság számos EU-program és EU-tagállam oktatási minisztériumával való konzultáció után a következőkben látta:

Az írás eredetileg az MTA honlapján jelent meg: http://www.mta.hu/index.php?id=634&no_cache=1&backPid=645&swords=csermely&tt_news=4986&cHash=13c4af9187



A Rocard-jelentés címlapja. A dokumentum angol nyelven elérhető a http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_en.pdf webhelyen.

- A természettudományok oktatása nem kellőképpen szolgálja és tartja fenn a természet iránti kisgyermekkorú kíváncsiságot.

- Az általános iskolai tanárok jelentős része nem érzi kellően kompetensnek magát a természettudományos tárgyak diszciplína-jellegű oktatásában, ezért húzódozik bármilyen, a szokásostól eltérő (nem frontális) oktatási forma alkalmazásától.

- Túlteng a memoriter megközelítés, a modern társadalom változó és komplex problémáinak megoldására felkészítő problémamegoldó és szemléletadó (tudáshálózat-építő, tanulni megtanító) megközelítés sokszor elő sem kerül.

- Hiányzik a team-munka.

- Igen sok helyen hiányzik a kísérletes megközelítés, nem terjedtek el ennek modern és olcsó megoldásai.

- Az oktatás megújítására rendkívül sok kiváló kezdeményezés született és a természettudományos tárgyak oktatásában kiváló tanáregyeníiségek dolgoznak – sajnos nagyon sok esetben ezek az elképzelések elszigeteltek maradtak, és a kiváló gyakorlati megvalósítás formái még a tagállamokon belül sem terjednek el, EU-szinten történő integrációjuk szinte teljesen hiányzik.

- Az oktatási folyamat sok esetben iskolába zárt, nem vesznek benne részt a kutatóintézetek, az egye-

temek, a K+F fejlesztő cégek, a tudományos múzeumok és a társadalom más érintett tagjai, csoportjai, szakmai és civil szervezetei.

- A természettudományos oktatás során nincsenek kidolgozva a speciális női szemléletet és igényeket figyelembe vevő pedagógiai módszerek és megközelítési formák, valamint nem esik elegendő szó a tudományban és az innovációban jelen lévő sikeres női példaképekről.

- *Magyarországon nagy hagyományai vannak a matematikai és természettudományos képzésnek, a nagyevű alma materekben megalapozott tudás jelentőségét számos tudósunk tartja fontosnak megemlíteni interjúkban, visszaemlékezésekben is. Mi tehát valójában a probléma? Mi változott meg a természettudományos közoktatásban?*

- Több helyen hoztak az elmúlt évtizedek változást.

- Az első az ismeretek elképesztő mértékű és iramú bővülése. Igen sok esetben a napi életben azok a tudományos ismeretek és alkalmazásaik kerülnek elő, amelyek a legújabb tudományos eredményekkel kapcsolatosak. Ezek sokszor csak közvetetten illeszkednek a hagyományos tananyagban szereplő ismeretekhez. Így a napi gyakorlat, igények és az oktatott anyag egymástól sok esetben egyre jobban elszakadnak.

- Bekerült az életünkbe az internet, amely a tanuló egyre szélesebb köreinek szinte minden tudományos kérdésben bőséges információforrást ad. Egyre kevésbé az információk fellelése okoz problémát, sokkal inkább értékelésük és érvényességük (validálásuk) megítélése a kulcskérdés. Ez is a tudáshálózat, a szemléletadás és a problémamegoldó gondolkodás a memoriter „kárára” történő bővítésének szükséges-ségét húzza alá.

- Az élet egyre elképesztőbben új és egyre bonyolultabb problémákat vet fel, amelyek megoldásához a korábbi tanulmányok során be nem dresszírozható, új módszerek és megoldások kellene.

- A társadalmi kapcsolatok bővülése és a tudásmorzsák fragmentálódása (a specializáció) egyre jobban igényli a team-munkát.

- A média térhódítása (vizuális kultúra, interaktív módszerek stb.) egyre „unalmasabbá” és nem „pörgővé” teszik a hagyományos tanári módszereket.

- Tanáraink jelentős része az oktatási rendszer minden változása és a társadalmi környezet minden kedvezőtlen hatása (az iskolára hárított pl. családi feladatok elburjánzása, tekintélyvesztés, fizetések stb.) ellenére (hála Istennek) „kitart”, és emberfeletti erővel hihetetlen teljesítményt nyújt EU-szinten mérve is. Ugyanakkor a tanári gárda fokozatosan differenciálódik, tanáraink egy része elfásul, kiég, igénytelenné és feladatának színvonalas ellátására alkalmatlanná válik.

- *Milyen javaslatokat tett a szakértői bizottság? Hogyan, milyen módszerekkel növelhető a természettudományok iránti érdeklődés? Milyen tanári attitűdöt tartanak helyesnek?*

– A szakértői bizottság a következő lépéseket látja alapvetően fontosnak:

- A természettudományos tárgyak (ideértve a matematikát is) oktatásának színvonala Európa egész jövőjének egyik kulcsfontosságú kérdése.

- A jelenlegi helyzet javításának kulcsfontosságú helye az iskola és kulcsfontja a tanáregyéniség. A pedagógiai módszerek megújítása szükséges, ennek során a kérdéseken és problémamegoldáson alapuló párbeszédes tanítási formának, valamint a tagállamokban kifejlesztett és bevált pedagógiai újításoknak az eddigiekhez képest nagyobb hangsúlyt kell kapniuk. Ennek érdekében mind a tagállamok szintjén, mind pedig EU-szinten elő kell segíteni a természettudományos tárgyakat oktató tanárok rendszeres kommunikációjának és hálózatainak kialakítását.

- A lányok részvételének növelésére, érdeklődésének fenntartására mind új pedagógiai módszerek, mind pedig sikeres női tudós és K+F fejlesztő példaképek rendszeres ismertetése szükséges.

- A természettudományos tárgyak oktatásának megújításába a helyi közösség minden érintett tagját (tanárok, diákok, szülők, tudósok, mérnökök és szervezeteik, pl. iskolák, tanár és szülői szervezetek, egyetemek, tudományos intézetek, tudományos múzeumok, cégek és a fenntartók) be kell vonni. E folyamatban az iskolán belüli és kívüli oktatási módszereket ötvözni kell.

- A természettudományos tárgyak oktatásában már eddig is bevált és több EU-tagállamban sikeres példákat (mint pl. a Pollen vagy a Sinus-Transfer projektet) el kell terjeszteni az EU egészében, erre körülbelül 60 millió eurót az EU Bizottságnak biztosítania kell.

- A folyamat állandó figyelemmel kísérésére a természettudományos tárgyak oktatásával foglalkozó európai tanácsadó testületet (European Science Education Advisory Board) kell felállítani. E testületnek kiemelten kell foglalkoznia a tudomány iránt érdeklődő diákok hálózatainak segítségével, valamint az új módszerek monitorozásával és a sikeres módszerek elterjesztésével.

– *Ismert, hogy a tehetséggondozást, az elitképzést fontos, támogatandó területnek tartja. Felvetődik tehát a kérdés: milyen mértékben lehet vagy kell a közoktatásban differenciáltan tanítani, és miféle lehetőségekre van szükségük a kiemelkedően tehetséges diákoknak?*

– Igen, a hazai és határon túli magyar civil tehetséggondozó szervezeteket tömörítő Nemzeti Tehetségsegítő Tanács (www.tehetsegpont.hu) elnökeként is igen fontosnak tartom a tehetségek kibontakoztatását mind az oktatási folyamatban, mind azon kívül. Jómagam több mint tíz évvel ezelőtt indítottam el a kutató diák mozgalmat (www.kutdiak.hu), amely középiskolás diákok ezreinek adott már eddig is értékteremtő élményt a legmagasabb szintű kutatásokon belül. A tehetségfogalom igen sokat gazdagodott az elmúlt évtizedekben. Ma már egyre jobban felismerjük, hogy mindenki tehetséges, a nagy kérdés tehát annak felfedezése, hogy az adott diák éppen



Csermely Péter

miben az. Ez az iskolától a pedagógiai módszerek és helyzetek sokkalta nagyobb diverzitását, sokszínűségét követeli meg, hogy a legváltozatosabb tehetségforma is megnyilvánulhasson. A sokszínűség tiszteletét biztosítani kell. Egyetemi professzorként mondom és vallom, hogy a kiválóan gördeszkázó diákokot éppúgy megilleti a tisztelet, mint az OKTV-n első helyezett. Az önbecsülés felkeltése bármely területen kiválóan szolgálja a többi területen esetleg megmutakozó lemaradások megoldását is. Azaz a differenciálást nem mereven, hanem rendkívül sok dimenzió mentén és folyamatosan változó módon kell megoldani. Olyan rendszert kell kidolgozni, amely a diákok tényleges teljesítményén és motivációján alapul, és egy piramisszerű elrendezésben egyre többet és többet teljesítő diákokat szakmailag indokolható, átlátható és ellenőrizhető módon egyre több lehetőséghez juttatja.

– *Az oktatás megújítása csak akkor lehetséges, ha a pedagógusok képesek újszerűen, új módszertani ismeretek birtokában, esetenként újrafogalmazott tanterv szerint tanítani. A curriculum fejlesztése és a tanárképzés terén milyen feladatokat lát?*

– A változások indukálásának valóban a tanárképzés megújítása az egyik legfontosabb terepe. Fokozott hangsúlyt kell fordítani az alábbi elemek szerepeltetésére:

- A nem frontális jellegű oktatási formák használatának és kitalálásának (fejlesztésének) begyakoroltatása.

- Problémamegoldó és szemléletadó (tudáshálózat-építő, tanulni megtanító) megközelítések, az interneten elérhető információk validálásának megtanítása.

- Az epochális oktatási formák, a team-munka begyakoroltatása.

- A kísérletes megközelítések modern és olcsó formáinak megismerése.

- A tanárjelöltek kapcsolatteremtő, együttműködő, hálózatképző készségeinek fejlesztése.

- A speciális női szemléletet és igényeket figyelembe vevő pedagógiai módszerek és megközelítési formák, a tudományban és az innovációban meglévő sikeres női példaképek megismertetése.

• A tanárjelöltek tanítási gyakorlatának a gyakorlóiskoláktól különböző helyzetekben (hátrányos helyzetű diákok stb.) is történő megszervezése.

A fenti elveknek és szempontoknak nemcsak a tanárképzés, hanem a tanár-továbbképzés területén is az eddigieknél jobban meg kell jelennie.

Álmom egy olyan iskola, ahol a reguláris oktatást időről időre megszakítják a véletlenszerű elemek. Olykor a még véletlenszerűbb elemek, és ritkábban a szinte már elképzelhetetlen elemek. Én azt tartom kiváló iskolának, ahol kihasználják az epochális oktatást, amivel egyébként a magyar közoktatás már régóta rendelkezik. Az iskola és a tanítási folyamat is fölfogható eseményláncolatként. Ha az eseményláncolat jól működik, akkor a végeredmény nem egy reguláris folyamat, tehát amikor mindig ugyanaz ismétlődik, hanem olyan, ahol a véletlennek igenis szerepe van, méghozzá gyakori módon, hetente vagy akár naponta is. Egy okos iskola, ha ezt jól csinálja, akkor ezt akár tervezheti is. Bátorítja, és nem kirúgással fenyegeti azt a pedagógust, aki elviszi diákjait a park-

ba, és ott tart órát nekik *Csokonai* mintájára. Ezt a diák is örömként éli meg, és az ott hallott dolog talán örökre megmarad, mivel más környezetben hallotta, mint amit megszokott. A diákokkal abbahagyatják időnként a napi rutint, egyszer, kétszer, háromszor a tanév során, és lehetőséget adnak nekik, hogy válasszanak valami rendkívül érdekes tevékenységet, amelyre lehet, hogy nem lesz szükségük később, de megtanulják a csapatmunkát. Megtapasztalhatják, hogy a tanárokkal együtt lehet dolgozni huzamosabb ideig egy bizonyos cél érdekében, intergenerációs kapcsolatokat kiépíteni a munka, az együttműködés során, ami szinte elképzelhetetlen egy olyan teljesen kiegyensúlyozatlan szituációban, amelyben a tanár feleltet, a diák meg retteg. Az élet nem tudástartalmak felhalmozásáról szól, hanem projektekről. Ott egy ilyenfajta szemléletet kell tudni elsajátítani: kitűzők egy távlati célt, ehhez milyen konkrét műveletsort kell nekem vagy a kollégáimmal együtt nekünk kitalálni, és ma mit kell ahhoz tennem, hogy ezt megcsináljam.

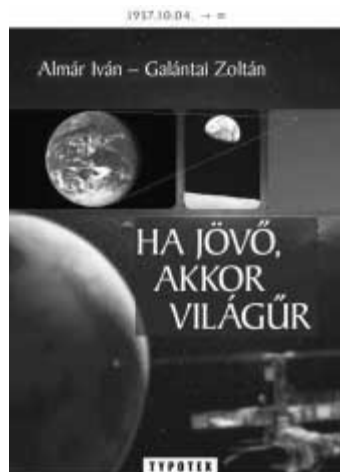
PÁLYÁZATOK

PÁLYÁZAT KÍSÉRLETI FIZIKÁBÓL

A Szegedi Tudományegyetem TTK Kísérleti Fizikai Tanszéke az ELFT Csongrád megyei Csoportja támogatásával 2008 tavaszán rendezi meg ATOMFIZIKA tárgykörben kísérleti versenyét Szegeden. Középiskolás tanulók pályázhatnak (1 vagy 2 fő) olyan dolgozattal, amelyben leírják a bemutatandó kísérlet elvégzésének menetét, az alkalmazott módszereket, bemutatják az eredményeket. A maximum terjedelem 10 oldal (ábrákkal és referenciákkal együtt). A beküldési

határidő 2008. január 18. (SZTE KFTSZ, 6720 Szeged, Dóm tér 9., *Szatmári Sándor* egyetemi tanár címére). A legjobb pályamunkák készítői meghívást kapnak a márciusban rendezendő „éles” bemutatóra (SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék), s a nyertesek pénz- és könyvjutalmat kapnak (felkészítő tanárokkal egyetemben).

Érdeklődni *Nánai László* egyetemi tanár címén lehet: e-mail: nanai@physx.u-szeged.hu, tel.: 62/544-359, 06-30-2492675



Ötven évvel az űrkorszak kezdete után egyre világosabbá válik, hogy az emberiség jövője elválaszthatatlan a világűrtől – ezért fontos feladat már ma is egyrészt a kozmikus környezetünkből származó veszélyek, másrészt az űrbajózás távlati lehetőségeinek áttekintése. Jövünk és a kozmosz viszonyának egész sor alapvető kérdése merülhet fel.

A kérdésekre ezúttal egy űrkutató, illetve egy jövőkutató keres válaszokat – együtt, ám néha eltérően. Ma még messze nincs válasz mindegyikre. Ez azonban nem akadályozhatja meg, hogy megpróbáljuk objektíven és reálisan áttekinteni és megvitatni azokat a problémákat, amelyekkel az emberiségnek a nem túl távoli jövőben várhatólag szembe kell néznie.

A Typotex Kiadó szeretettel meghívja Önt előadás-sorozatának következő állomására, melyet december 12-én, szerdán 17.30-kor

Almár Iván és Galántai Zoltán tart

Ha jövő, akkor világűr című könyvük 4. fejezetéről,

A távolabbi jövő perspektívái címmel.

Helyszín: Olvasók boltja, 1052 Budapest, Pesti Barnabás u. 4.

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Befektetés a tudásba, befektetés a jövőbe

A Magyar Tudományos Akadémia az Európai Unióval, az UNESCO-val (az ENSZ Oktatási, Tudományos, Kulturális Szervezetével) és az ICSU-val (a Tudomány Nemzetközi Tanácsával), azaz a világ nem kormányzati tudományos szervezeteinek szövetségével együttműködve 2007. november 8–10. között harmadik alkalommal szervezi meg a Tudomány Világforumát (World Science Forum – WSF).

A Fórum időpontjának kiválasztása alkalmazkodik az UNESCO-hoz, hiszen november 10-ét az UNESCO a Tudomány Világnapjául választotta. A Fórum Parlamentben tartandó utolsó ülése egybeesik a Tudomány Világnapjával. Ily módon időben is egybeolvad Budapesten a magyar és nemzetközi megemlékezés a tudományról, annak jelentőségéről, és hangsúlyozza azt az általános meggyőződést, hogy aki a tudásba fektet be, az a jövőt építi.

A Harmadik Világforum előzményei 1999-re vezethetők vissza, amikor az UNESCO és az ICSU Budapesten szervezte a Tudomány Világkonferenciáját (WCS). Akkor 134 ország, illetve nemzetközi szervezet képviselői mondták el véleményüket a 21. század aktuális tudománypolitikai kérdéseiről. A világ csaknem ezer tudósa 25 szekcióban vitatta meg a tudomány és a társadalom kapcsolatát.

Már a Világkonferencián felvetődött, hogy további rendezvényekkel kellene folytatni a nagyon sikeres tanácskozást, mindig az aktuális kérdések megvitatásával. Ezért született meg a javaslat, hogy Magyarország rendezzen két évente *World Science Forumot*, a Tudomány Világforumát. A javaslatot felkarolták az egymást követő magyar államfők és kormányok, és megadták a szükséges erkölcsi és anyagi támogatást.

Az első ilyen rendezvényt 2003. november 10–12. között, a másodikat 2005. november 10–12. között tartották Budapesten. Mindkét esetben, ahogyan a harmadik Világforum esetében is, együttműködő partnerek az UNESCO, az ICSU és az Európai Unió voltak. Az első Fórumon háromszáz neves külföldi és mintegy száz magyar tudós vett részt. Az első Világforum a tudásalapú társadalom kérdéseivel foglalkozott, és megalapozta a további fórumok rendszeres, két évenkénti megtartásának lehetőségét, a tudás, a tudomány és a társadalom aktuális kérdéseinek széles körű megvitatását.

A második Világforum a tudás, az etika, a felelősség kérdéseivel foglalkozott. Ezen a rendezvényen már több mint 400 külföldi vendég, közöttük Nobel-díjasok, számos akadémiai elnök és nemzetközileg ismert tudós vett részt.

A harmadik Világforum követi a hagyományokat, azt hangsúlyozza, hogy a tudomány és a tudás jóval több, mint az emberi kíváncsiságtól, a világ megismerésének vágyától vezérelt ismeretgyűjtés: napjainkra a természet és az emberi társadalom fejlődésének legfontosabb eszközévé vált. Jövőjük csak azoknak az országoknak van, amelyek ezt felismerve befektetnek a tudományba.

A látványos fejlődés mellett előre nem látott gondok, nem várt fejlemények és új kérdések is adódnak. Ilyen probléma a globális klímaváltozás és az ezzel szorosan összefüggő energiatermelés. A problémák csak akkor oldhatók meg, ha a tudás előállítói és felhasználói meg tudnak egyezni a tudás és a tudomány új szerepéről a globalizált világban.

A harmadik Világforum védnöke *Sólyom László*, a Magyar Köztársaság elnöke lesz, aki nemcsak megnyitja a fórumot, de megszervezte a környezet iránt elkötelezett kormányfők tanácskozását is. Ugyancsak a védnökök között szerepel *Jose Manuel Durao Barroso*, az Európai Bizottság elnöke, *Koichiro Matsuura*, az UNESCO főigazgatója és *Goverdhan Mehta*, az ICSU elnöke.

A rendezvény új vonása, hogy 10 tagú nemzetközi irányító testület alakult *Vizi E. Szilveszter*, az MTA elnöke vezetésével, amely a harmadik és a további fórumok felügyeletét látja el, tanácsokat adva a téma-választásban és a lebonyolításban.

A harmadik Világforum munkáját, a plenáris ülésen kívül öt szekcióban fogja végezni. Ezek a következők:

- Befektetés a tudásba a környezet érdekében
- A tudomány, a technológia és az innováció szerepe a millenniumi fejlesztési célok elérésében
- Tudomány és innováció mint globális vállalkozás
- Befektetés a jövő nemzedékekbe
- Befektetés a tudásba a gyorsuló gazdaságokban

www.mta.hu

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: mail.elft@mtesz.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulattól vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.
Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Felhívás fizikatanároknak

A fizikatanárokat érintő információk áramlásának elősegítésére az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöksége és tanári szakcsoportjai személyes kapcsolatfelvételt kezdeményeznek a fizikát tanító kollégákkal.

Kérjük, rövid bemutatkozással (név + e-mailcím + helység + iskola) a tapodyeva@gmail.com e-mailcímen keressék meg *Moróné Tapody Éva* főtítkárhelyet-

test, aki a jelentkezéseket koordinálja. A további információkat e-mailben küldjük majd.

Moróné Tapody Éva, az ELFT főtítkárhelyettese

Kiss Gyula, az ELFT Általános Iskolai Szakcsoport elnöke

Pákó Gyula, az ELFT Középiskolai Szakcsoport elnöke

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Nemzetközi konzorcium távcsőépítésre

Öt nagy amerikai és európai intézet konzorciumot alapított egy 25 méter antennaátmérőjű szubmilliméteres teleszkóp megépítésére Chilében, az Atacama sivatagban az 5600 méteres Cerro Chajnantor csúcson. A nagy magasság és a száraz sivatagi éghajlat fontos feltétele a kutatásnak a szubmilliméteres tartományban, mivel a levegő nedvességtartalma nehezíti a méréseket. A tervek szerint 2013-ban elkészülő 100 millió dolláros berendezés a maga nemében az első lesz a világon. A projektet korábban Cornell Caltech Atacama Teleszkópnak (CCAT) nevezték, és 2004-ben kezdődött el a koncepció kidolgozása. A Cornell Egyetem és a Caltech kétmillió dollárt költött előzetes tanulmányokra. A terv megvalósítására a California Institute of Technology (Caltech), a hozzá tartozó Jet Propulsion Laboratory (JPL), a Cornell Egyetem, a Colorado Egyetem, Boulder, a kanadai Brit Kolumbia Egyetem, valamint a brit Astronomy Technology Centre konzorciumot hozott létre.

A teleszkóp a legmodernebb technológiát fogja alkalmazni, amely lehetővé teszi, hogy olyan csillagászati jelenségeket is tanulmányozzanak, amelyek más hullámhossztartományban nem vizsgálhatók. A szubmilliméteres technika különösen alkalmas olyan objektumok leképezésére, amelyek nem sugároznak a látható fény tartományában. Így az Atacama-teleszkóp segítségével megfigyelhető lesz csillagok és bolygók kialakulása gáz- és porfelhőkből, valamint megállapítható lesz a molekuláris ködök összetétele, amelyekből a csillagok állnak. Természetesen, a 25 méteres teleszkóppal a Világegyetem nagyléptékű szerkezete is tanulmányozható lesz. A tervezett 100 millió dolláros költségből 20 milliót a legmodernebb műszerek beszerzésére fordítanak, így például a 25 méteres tányérantennát nagyméretű szubmilliméteres kamerák is kiegészítik, ezáltal a berendezés mérete kétszerese lesz a jelenleg működő legnagyobb szubmilliméteres teleszkópénak.

<http://www.spacedaily.com>

Amerika világrekorddal szerezte vissza vezető szerepét

Az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban (ORNL) működő, 1,4 milliárd dolláros nagyberendezés, a *Spallation Neutron Source* (SNS) új világrekordot állított be, és ezzel a világ legnagyobb teljesítményű neutronforrása lett. A korábbi rekordot az Egyesült Királyság SIS elnevezésű neutronforrása tartotta, amely 183 kilowatt teljesítmény mellett 160 kilowatt nyalábteljesítményt ért el. Az SNS berendezés teljesítménye 1,4 megawatt, és közel egy nagyságrenddel több neutront szolgáltat, mint a világ eddigi legnagyobb pulzált neutronforrása. Az új rekordot az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium igazgatója, *Thom Mason*hoz csatlakozva Tennessee állam három vezető politikusa, *Lamar Alexander* szenátor, valamint *Bart Gordon* és *Zach Wamp* képviselő jelentette be. Mason szerint az ORNL „minden eddiginél hatékonyabb eszközt ad a tudósok kezébe, hogy megértsék a mole-

kulák szerkezetét, valamint a modern anyagok tulajdonságait meghatározó viselkedést. Ha megtanuljuk, hogyan kell erősebb, könnyebb és olcsóbb anyagokat előállítani, segíthetjük az amerikai ipart, hogy új termékek korlátlan változatosságát állítsák elő.”

A neutronszórás tanulmányozása egyike azoknak a területeknek, ahol az USA elvesztette vezető szerepét. A neutronszórás kísérleti vizsgálatát a Manhattan-projekt keretében Oak Ridge-ben kezdték el. A következő évtizedekben aztán egyre nagyobb teljesítményű neutronforrásokat építettek Európában és Ázsiában, egyre inkább arra kényszerítve az amerikai kutatókat, hogy kísérleteik elvégzéséhez külföldre menjenek. Az SNS vissza fogja állítani az Egyesült Államok vezető szerepét a neutronszórási kísérletek területén.

www.ornl.gov

Új műszer veszélyes vegyi anyagok titkos észlelésére

Az Argonne Nemzeti Laboratórium kutatói új műszert fejlesztettek ki, amely titokban, nagy távolságról képes észlelni vegyi anyagok gőzeit, és nagy segítséget jelent a kémiai vagy nukleáris eszközöket használó terrorcselekmények leleplezésében. Ezt a technológiát sok más feladatra is eredményesen lehet használni, mint például környezetszennyezés detektálására vagy égési sebesülések vizsgálatára fizikai kontaktus nélkül.

A passzív milliméteres hullámhosszú spektroszkópia (PmmWS), amelyet az Argonne kutatói, *Sami Gopalami*, *Sasan Bakhtiari*, *Paul Raptis* és *Thomas Elmer* fejlesztettek ki, több kilométeres távolságból is képes

észlelni és azonosítani kémiai anyagokat igen kis, 100–1000 ppm koncentrációban. Ez az új technológia 2007-ben K+F díjban részesült, amelyet a kutatók *a találmányok Oscar-díjának* neveznek. A kutatócsoport a műszert elsősorban arra a célra fejlesztette ki, hogy engedély nélküli nukleáris tevékenységet észleljen. Egyes vegyi anyagok jelenléte ugyanis egyértelműen jelzi az atomfegyverek gyártásához szükséges anyagok reprocesszálását vagy azok dúsítását. Ez a passzív módszer, szemben egyéb távérzékelő módszerekkel, mint például radar vagy infravörös kamera használata, észlelhetővé teszi a megfigyelés tényét.

www.anl.gov

Felfedezték az eddigi legnehezebb szilíciumizotópot

A Michigan Állami Egyetemen működő Nemzeti Szupravezető Ciklotron Laboratórium (NSCL) kutatóinak sikerült előállítani és azonosítani az eddig megfigyelt legnehezebb szilíciumizotópot. A 44-es tömegszámú ^{44}Si -atommag azonosítása tovább növeli az ismert izotópok számát, és tovább erősíti a neutronfelesleggel rendelkező atommagok vizsgálatának lehetőségét.

Megközelítőleg 6000 atommag létezhet kötött állapotban a proton és neutron leszakadási vonalak között, de kísérleti információink csak körülbelül 2830-ról van (beleértve a kb. 260 stabil atommagot is). Adott számú proton mellett az atommagban kötött neutronok száma nem növekedhet egy bizonyos határon túl, ez a határ a leszakadási vonal. A neutron le-

szakadási vonalhoz közeli izotópok vizsgálata a kísérleti magfizikai kutatások egyik fő célja. Például a ^{43}Si -izotópot először Japánban, a Fizikai és Kémiai Kutatóintézetben (RIKEN) sikerült megfigyelni 2002-ben. Ugyanebben az évben a franciaországi GANIL laboratóriumban *Lukjanov* és társai figyelték meg elsőként a neutronban gazdag ^{34}Ne - és ^{37}Na -izotópokat.

Az NSCL-kísérletben ez év januárjában ^{48}Ca -ionokat gyorsítottak fel 142 MeV/nukleon energiára és irányítottak wolfram céltárgyra. A szórt nyalábot a laboratórium A1900 elnevezésű fragmentumszeparátorával megszűrve 20 különböző izotópot sikerült a detektorokkal azonosítani (köztük három esetben a ^{44}Si -atommagot is).

<http://cerncourier.com>

Nyilvánosságra hozták az ötszáz leggyorsabb számítógép listáját

2007. június 26–29. között Drezdában 47 országból több mint 10 000 résztvevővel került megrendezésre a Nemzetközi Szuperszámítástechnikai Konferencia (International Supercomputing Conference). A konferencián hozták nyilvánosságra a világ 500 leggyorsabb számítógépének listáját. Negyedik alkalommal került az első helyre az IBM és a National Nuclear Security Administration (NNSA) által kifejlesztett BlueGene/L System, amely a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumban működik. A gép csúcsebessége másodpercenként 280,6 teraflop. Két további gép ért el 100 teraflopnál nagyobb sebességet, második lett az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium korszerűsített Cray XT4/

XT3 rendszere 101,7 teraflop/s, míg a harmadik helyre a Sandia Nemzeti Laboratórium Cray Red Storm rendszere került 101,4 teraflop/s sebességgel.

A leggyorsabb európai gép spanyolországi, a Barcelona Supercomputing Center IBM JS21 klasztere, amely 62,63 teraflop/s sebességgel a 9. helyezett. A leggyorsabb japán gép a Tokyo Institute of Technology gépe, amely egy Sun Fire x4600 alapú NEC integrált rendszer Opteron processzorokkal, a listában a 14-ik. A száz leggyorsabb gép közül 57 dolgozik az Egyesült Államokban. A részletes lista az internetről letölthető.

<http://www.top500.org/lists/2007/06>

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

