Magyar Tudomány

NANOTECHNOLÓGIA

Vendégszerkesztő: GYULAI JÓZSEF

2003 • 9

A Magyar Tudományos Akadémia folyóirata. Alapítás éve: 1840
CIX. kötet – Új folyam, XLVIII. kötet, 2003/9. szám

Fôszerkesztô:
Csányi Vilmos

Vezetô szerkesztô:
Elek László

Olvasószerkesztô:
Majoros Klára

Szerkesztôbizottság:
Ádám György, Bencze Gyula, Czelnai Rudolf, Császár Ákos, Enyedi György,
Kovács Ferenc, Köpeczi Béla, Ludassy Mária, Niederhauser Emil,
Solymosi Frigyes, Spät András, Szentes Tamás, Vámos Tibor

A lapot készítették:
Csapó Mária, Csató Éva, Gazdag Kálmánné, Halmos Tamás, Matskási István,
Perecz László, Sperlágh Sándor, Szabados László, Szentgyörgyi Zsuzsa, F. Tóth Tibor

Lapterv, tipográfia:
Makovecz Benjamin

Szerkesztôség:
1051 Budapest, Nádor utca 7. • Telefon/fax: 3179-524
matud@helka.iif.hu • www.matud.iif.hu
Kiadja az Akaprint Kft. • 1115 Bp., Bártfai u. 65.
Tel.: 2067-975 • akaprint@matavnet.hu

Előfizethető a FOK-TA Bt. címén (1134 Budapest, Gidófalvy L. u. 21.);
a Posta hírlapüzleteiben, az MP Rt. Hírlapelőfizetési és Elektronikus
Posta Igazgatóságánál (HELP) 1846 Budapest, Pf. 863,
valamint a folyóirat kiadójánál: Akaprint Kft. 1115 Bp., Bártfai u. 65.

Előfizetési díj egy évre: 6048 Ft
Terjeszti a Magyar Posta és alternatív terjesztők
Kapható az ország igényes könyvesboltjaiban

Nyomdai munkák: Akaprint Kft. 25845
Felelős vezető: Freier László
Megjelent: 15,35 (A/5) ív terjedelemben
HU ISSN 0025 0325

TARTALOM

Nanotechnológia – az átalakulások tudománya

Gyulai József: Bevezető gondolatok 1076
Bársony István: Mikrogépészeti eljárásokkal a nanotechnológia felé 1083
Csurgay Árpád: Áramkörelmélet a nanoelektronikában 1090
Kroó Norbert: Felületi plazmonok és közeli tér mikroszkópia 1096
Czitrovszky Aladár – Hámori András – Kiss Árpád – Pogány Lajos: Nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgáló berendezés a nanotechnológia szolgálatában 1099
Barna Árpád – Menyhárd Miklós: Ionbombázás és nanotechnológia 1106
Kónya Zoltán – B. Nagy János – Kiricsi Imre: Szén nanocsövek előállítása és alkalmazásai 1114
Biró László Péter: Újszerű szén nanocső architektúrák 1122
Beke Dezső – Erdélyi Zoltán – Szabó István – Cserháti Csaba – Langer Gábor – Daróczi Lajos: Diffúzió nanoskálán 1130
Guczi László: Fém nanorészecskék katalitikus tulajdonságai 1138
Dékány Imre: Nanoszerkezetű anyagok és a kolloid állapot 1145
Kálmán Erika – Csanády Andrásné Bodoki Ágnes: Nanoszerkezetű bevonatok ... 1154
Vámosi György – Bodnár Andrea – Győrffi Miklós – Bene László – Damjanovich Sándor: Nanotechnológia a biológiában 1166

Tanulmányok

Csörgő Sándor – Rónyai Lajos – Ruzsa Imre: Mi mennyi? 1174
Wolfgang Glänzel – Schubert András – Braun Tibor: Eggyel kevesebb 1180
Komoly Sámuel: Neuroimmunológiai betegségek korszerű diagnosztikája és kezelése 1184

Tudós fórum

Tudomány mindenkinek 1193
World Science Forum 1195
Magyar Molekuláris és Prediktív Epidemiológiai Társaság 1196
Köszöntő 1197

Kitekintés (Jéki László – Gimes Júlia) 1198

Megemlékezés

Lévai András *(Büki Gergely – Csom Gyula)* 1203

Könyvszemle

Berend T. Iván: Kisiklott történelem – Közép- és Kelet-Európa a hosszú 19. században *(Szuhay Miklós)* 1205
Papp Sándor: Biogeokémia – Körfolyamatok a természetben; Fagyöngy civilizáció *(Mészáros Ernõ)* 1208
Térképtudományi tanulmányok *(Gercsák Gábor)* 1211
Tibor Fényes: Structure of Atomic Nuclei *(Lakosi László)* 1213
Újból élő és makacs halott *(Kovács Gyözõ)* 1215
Vízügyi történelem. *(Vágás István)* 1216

Nanotechnológia – az átalakulások tudománya

BEVEZETÕ GONDOLATOK

Gyulai József
az MTA rendes tagja, MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet
gyulai@mfa.kfki.hu

A *homo faber* új játékot fedezett fel. Hogy új-e az új, azt igyekszünk majd jelen összeállításunkban megmagyarázni, mert előzmények nélküli „új" ritkán születik. Idősebb emberként gyakran tapasztalom, hogy új néven, de új és a mai eszközeink szintjén „revizitálunk", újralátogatunk egy sor olyan jelenséget, amely ugyan ismert volt, de korábban nem látott vagy tudományos fantasztikumként kezelt aspektusai most merülnek fel és kapnak új jelentőséget. Amiről itt beszélünk, az is ilyen: koncepcióváltás, amely talán először sok vitát kavart, de végül sokakat meggyőzött – a finanszírozókat is –, hogy ezen a nyomvonalon sok gyémánt akad. A nanotudomány alapgondolata nagyon messze nyúlik vissza: Erwin Schrödinger *What is Life?* (1944) című dolgozata, James Watson és Francis Crick DNS-modellje (1953) már közelített a gondolatvilághoz. A legkonkrétabb váteszi megfogalmazás Richard Feynmantól származik, aki az 1959. december 29-i előadását az American Physical Society közgyűlésén *There Is Plenty of Room at the Bottom* címmel tartotta, amelyben megjósolta az egyre kisebb, önmagukat építő gépek lehetőségét – az egyes atomok mozgatása, rendezése határáig. A nagy gyakorlati lépést Gerd Binning és Heinrich Rohrer alagútmikroszkópja (scanning tunneling microscope, STM, 1981), annak variánsai, az erőmérő AFM (Atomic Force Microscope), a mágneses teret vagy az elektromos kapacitást mikroméretekben detektáló rendszerek megjelenése jelentette. Ezekkel egy időben született Feynman kiváló *Quantum Mechanical Computers* (1986) dolgozata. Mérföldkő a szén módosulatainak, a fulleréneknek, a nanocsöveknek felfedezése is (Richard Smalley, 1985, illetve Sumio Iijima, 1991). Az USA kongresszusa szavazott meg elsőként nagy összegű támogatást (*National Nanotechnology Initiative*, 2001) és az Európai Unió a 6. keretprogramban emelte a témát az egyik fő prioritássá. Hazánkban is többen pályáztak sikerrel a témában mind az OTKA, mind az NKFP keretében, mind az EU 5. és 6. keretprogram keretében – így e szám szerzői is.

Az egyébként önmagában is nagyszerű, ha a létrejött újat több tudományág is sajátjának tekinti. Kedvelt hasonlatom, hogy a kémiának a XX. század közepe táján bekövetkezett paradigmaváltása a fizika, a kvantummechanika eredményeinek beolvasztása révén jött létre. Szívesen citálom a *Cantata Profana* Balázs Béla-i pozitív „konfliktusát": a szarvassá változott fiúk nem férnek

be apjuk kapuján. A fizikustársadalom tagjaként örülnünk kell annak, hogy a mai kémia ezt az így létrejött diszciplínát tekinti „modern kémiának". A tudományos anyanyelveket meghatározó tudományoknak – ilyen a matematika, az alkalmazott matematika, a fizika – missziója is, hogy transzszubsztanciálódjanak (bocsánat a profanizációért…). És most jött el az ideje annak, hogy ez az alapvető természettörvényekre támaszkodó kémia és a fizika együttesen oldódjék fel az élettudományokban, majd az orvosi tudományban.

A fizika és az anyagok tudománya felől, a műszaki tudományok által is megérintett társszerkesztőként szeretném, ha átsütne az összeállításon, hogy az élettudományok is érettek erre a ***paradigmaváltásra***, mégpedig két ok következtében is.

Az egyik ezek közül egyértelmű, és kikövezi az utat a másodiknak: a fizika illetve a kémia jelenségorientált kutatásainak új felfedezései – a kapcsolódó, kongeniális műszaki kutatások, fejlesztések révén, valamint a számítástechnikai robbanás által megtámogatva – olyan mérési módszerbeli palettabővülést, érzékenység-, felbontóképesség-növekedést, valamint az idő- és képi felbontás olyan tökéletesedését hozták és tették elérhetővé (akár vásárolható berendezések képében), amelyek alapvetően és megkerülhetetlenül hozzájárulnak e paradigmaváltáshoz. Az emberi génállomány feltérképezéséről, a Genom projektről[1] csak álmodni lehetett volna, ha a félvezető chipgyártás, illetve a molekuláris biológia eszköztárát szinergizáló biochiptechnológia[2] és a kriptográfia (titkosírás és -fejtés tudománya) nem válik elidegeníthetetlen, kongeniális részévé az élettudományok által kitűzött feladatnak. Elmosódnak a tudományok határai, illetőleg olyan átjárandó határokat fedezünk fel, amelyeknél a partnerek „szomszéd" voltára korábban nem is gondoltunk.

A másik ok inkább ismeretelméleti, de nem kevésbé fontos elem. A gondolat abban a beszédmódban gyökerezik, amely az élettudományokban – ma teljesen érthetően – megszokott és elterjedt. Rendszeresen hallunk arról, hogy egy élőlény „alkalmazkodik" a környezethez, és ez biztosítja a fennmaradását (illetve a használt kifejezéssel: a „jobb" egyed marad meg és adja tovább a génállományát). Hogy egy falósejt észleli a „behatolót", és harcképtelenné teszi – az „élete árán" is. Hogy a bonyolult szervezetekben – mondhatjuk – föderális, sőt konföderális formában élnek (?) együtt a szerveink, annak elemei, valamint szimbiotikus és nélkülözhetetlen szolgáink vagy parazitaszerű vendégeink –

[1] A ***Genom program*** lényege a következő: (a ***Time*** kissé profanizáló zsurnalisztája szerint: „konyhai mixerrel") „húslevest" csináltak az emberi DNS-ből, majd a már mindössze tíz–húsz aminosavat tartalmazó törmelékekben a biochip segítségével meghatározták az aminosavak sorrendjét. És itt jött a kulcsötlet, miszerint a – védelmi célra folyamatosan fejlesztett – titkosírásfejtés, a ***kriptográfia*** segítségével, a dominójáték mintájára próbálgatták, hogy hogyan lehet e törmelékeket egymás végébe visszailleszteni.

[2] A kongeniális segédeszköznek, a biochipnek az a lényege, hogy – a félvezető áramkörök gyártására kitalált eljárásokkal – egy üveglapkán mozaikot alakítunk ki olyan anyagból, amelyre a molekuláris biológia eszköztárából ismert anyagok olyan molekuláit „fixálhatjuk", amelyek csak bizonyos aminosavakkal, fehérjékkel képesek kapcsolódni (műszaki nómenklatúránkkal: ezek „fehérjespecifikus detektorok"). Az így elkészült „biochipre" rácseppentjük a „húslevest", és az egyes detektorok megkötik a nekik megfelelő fehérjetörmelékeket. Ultraibolya fénnyel megvilágítva a chipet, annak az egyes DNS-szekvenciákkal kapcsolódott elemei egy fénylő rajzolatot adva fényt bocsátanak ki (lumineszkálnak). Mivel az egyes szenzorokat tudatos rendben helyeztük el a chipen, a fénylő kép az aminosavak sorrendjére jellemző. A sikerhez a chipeknek az a fő tulajdonsága is kellett, hogy egyszerre sok száz, sőt sok ezer DNS-törmelékben határozzák meg az aminosavak sorrendjét. A módszer szempontjából – a beképzeltség látszatát is elfogadva – a ***Genom projekt*** csak egy volt a lehetőségek közül, mert a koncepció átvihető soksok anyagra (például „proteomikává" fejleszthető), amelyek például a gyógyszerkutatást felgyorsítva, forradalmasítják azt.

felvetve akár a kérdést: *„Én vajon hány vagyok?”*. Tudjuk, hogy ez a beszédmód, az „alkalmazkodás” csak fedőneve valami olyannak, amit még gyakran hiányolnunk kell az élettudományokból. A földi életet – mai tudásunk, azaz minden valószínűség szerint kizárólag – az elektromos kölcsönhatások mozgatják, amelyre minden atomi-molekuláris folyamat visszavezethető, csak a rendszer elemeinek óriási száma minőségileg új megnyilvánulásokhoz vezet. A fizikus, a kémikus, az anyagtudós is használ fedőneveket akkor, amikor már visszavezette a jelenségek mozgatórugóit az alapvető természettörvényekre. Így valóban egy folyamat – diffúzió, fázisátalakulás, stb. – termodinamikai elvekre utaló hajtóerejéről, a ***driving force***-ról beszél. Ez az alapkérdés az élettelen világ folyamatainak kutatásában, és jól tervezett kísérletekkel általában meg is válaszolható – gyakran már a mai tudásunkkal is.

Hogy mire is gondolok?

A biológia történetei fantasztikusak és azért lebilincselők, élvezhetők a nem-szakemberek számára is, mert antropomorf gondolkodással fűszerezettek. Példával. Keletkezik, termelődik a szervezetünkben valami – a „hősünk”, például egy fehérje, amelynek „feladata” *(sic!)* a szervezetben építő funkciót betöltő fehérjemolekulák megjavítása. Hogyan is történik mindez? A mechanizmus értelmében ez a stresszfehérje

1. odaúszik a megjavítandó fehérjéhez (miért?),
2. érzékeli annak hibás voltát (hogyan?),
3. észleli a töltésállapotot (de mivel?),
4. megtalálja a hibát (hogyan?),
5. megjavítja (itt is sok izgalmas fizikai-kémiai esemény zajlik le).
6. „Hősünk” feltehetőleg belepusztul mindebbe.

A fenti, fantasztikusan érdekes eseménysor hajtóerejét a mai gondolkodási keretben nem tudom másnak nevezni, mint valamiféle „missziónak”, vagy tréfásan és végletesen, éppen „csintalanságnak”? Mi másért megy oda a másikhoz, miért nem hagyja azt békében? Milyen energetikai, elektromosan töltött vagy éppen kisült állapotban van, hogy egy kis energiacserére „vágyik”? Nyilván nincs tudata. Mit nyer, illetve veszít ő ezzel?

Mi tehát ezen antropomorfizmusok értelme, oka – a fizikában, kémiában? Mi az a „késztetés”, ami látszólag logikátlan eseményekben csúcsosodik ki és tartja fenn az Életet? Holott tudjuk és – meggyőződésünk szerint – azonosítjuk, vagy megnyilvánulásként vesszük tudomásul, hogy nem lehet másról szó, mint a Coulomb-kölcsönhatásról, illetve annak olyan manifesztációiról, mint a van der Waals-erők, a hidrogénkötés, a di- és multipólus-kölcsönhatások, stb. rendkívül bonyolult játékáról. A „csintalanság”-típusú fogalmak semmiképpen sem lehetnek „lineárisak”, mert a linearitás leírásába nem fér, hogy egy (kvantummechanikai) rendszer működésbe jöjjön azért, hogy kimozdítson egy másik rendszert annak metastabil állapotából.

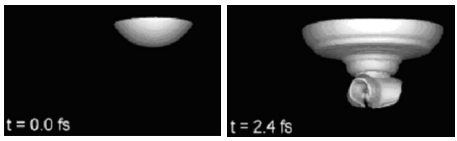
Vagy más területekről. Tudott dolog, hogy az atomi mozgásokat, átrendeződéseket – ezeket nevezzük fizikai, kémiai reakcióknak – a hő gyorsítja (Arrhenius törvénye). Mi a fizika, kémia válasza arra, hogy egyes tengeri élőlények a hideg tengervizet „szeretik”, vagy az emlősök hím reprodukciós szerve nem lehet a hőstabilizált szervezet belsejében? Vagy egy kertembeli rejtély: a „sövényképző” gyertyánbokraim preferáltan egymás felé nőnek. A fajtárs anyagcseretermékei vonzzák-e, vagy annak azonos színe láttatja „üres”, betölthető térnek a másikat, vagy netán a létért való küzdelem „ellenséges” szándékú kiszorítási kísérlete manifesztálódik?

Én valahol azt a szintézist várom, amely feleslegessé vagy éppen megalapozottá

teszi az antropomorfizmusokat – és boldog lennék, ha hátralévő életembe beleférne annak megszületése, feltehetőleg csak a legegyszerűbb rendszerekre – sok-sok zseniális, multidiszciplináris gondolkodású kolléga tevékenysége vagy akár csak víziója révén. Ma, szintén a számítástechnika eredményeinek alkalmazásával, már olyan problémákat is vissza tudunk vezetni első elvekre, amelyekre korábban nem gondolhattunk. Biró László Péter barátom belefoglalhatta volna a cikkébe a kiváló informatikus, Márk Géza munkatársunkkal közös eredményünket, amely *ab initio* kvantummechanikai alapokból kiindulva, az elektronok folyamának mozgóképeként mutatja be egy nanocső pásztázó mikroszkópos vizsgálatát[3] ***(1. ábra).***

Semmiképp sem állítjuk, hogy a mai biológia problémáinak ilyetén visszavezetése közeli lehetőség, de ha a lehetőségek a címlapproblémák mögött kullognak is, a felzárkózás nagy érdek. A mély megismerés képes csak az elhamarkodott alkalmazások csapdáitól megóvni, illetve a továbblépéshez ötletet adni.

Most, e *Bevezetõ* írása közben fogalmazódott meg bennem, mint – születésem óta – „homo faber"-ben az, hogy mi vonz, annak kezdeteitől fogva, a nanotechnológiához. Úgy érzem ugyanis, hogy ez az a tudományág, amelynek gondolkodásmódja közelebb tud vinni a kívánt megértéshez, vagy – egyszer, a jövőben – akár a megoldás kulcsát is képes megadni. A nanotechnológia általam értett lényegéből fakad, hogy ellessük az élő „természettől" a *driving force* fizikai lényegét. Először modellkísérletekben reprodukáljuk, például pásztázó szondás eljárásainkkal,



1. ábra • Pásztázó alagútmikroszkópos (STM) vizsgálat során a „tű" a felső korong egy (elágazó) szén nanocsövön szétterjedő elektronhullámnak „első elvekre" visszavezetett számításos folyamata. A felső ábra a „tű" modelljét, az alsó ábra az elektronátugrás kezdetétől számítva a 2,4 fs (1 femtoszekundum = 10^{-12} s) eltelte utáni állapotot mutatja, amikor is a hullám már a csövön terjed. A teljes folyamat mozgóképen is megtekinthető a http://www.mfa.kfki.hu/ honlapon, a Laboratories, Nanostructures, Animation könyvtárakat választva.

amikor akár egyetlen atomot megfogva és tudatos helyre helyezve azt, létrehozunk egy funkciót, amely nem létezhetett egy „evolúciós" rendszerben. Majd megkeressük azt az ezzel ekvivalens kölcsönhatásokra képes, komplex rendszert, amely a modellkísérleteink körülményeit „termelés" jellegűvé teszi. Itt már közel járunk a kolloidkémia módszereihez, és ezért mondják e tudomány művelői, hogy ők mindig is nanotechnológiát „csináltak". De egy lényegbevágó különbséggel: a kémia tömbi reakciókat valósít meg, a nanotechnológia filozófiája azonban igényli, hogy vezérelni tudjuk a kémiai reakciók támadási pontjait. Ha az informatikai alkalmazásokra gondolunk: képesnek kell lennünk rendezett, például négyzet- vagy hatszöghálóba szervezett elrendezéseket létrehozni – ez is az „önszerveződések" családjába tartozó folyamat. Ez teszi ugyanis lehetővé, hogy az egyes elemekhez egyedileg, címzetten hozzáférhessünk. Mindezzel a tudással felvértezve azután megpróbáljuk általánosítani a preparatív eljárást akár a szervetlen világ részecskéire is, hogy azokat is hasonlóan rendezhessük el valamilyen funkcionális rendszerré. Nemrégen a gyakorlatban is demonstrálták az elvet, amikor a DNS-szálak összekapcsoló-

[3] Márk Géza I. – Biró L. P. – Koós A. – Osváth Z. – Gyulai J. – Benito, A. M. – Thiry, P. A. – Lambin, P. (2001): Charge Spreading Effects during 3D Tunneling through a Supported Carbon Nanotube. in Kuzmany, H. – Fink, J. – Mehring, M. – Roth, S. (eds.): *Electronic Properties of Molecular Nanostructures*. AIP Conf. Proceedings, Vol. 591, 364-367.

dásakor sikerült maximum öt rézatomot is közrezáratni[4]!

Ha hozzáteszem azt is, hogy az így előálló „bottom up" („építkező", Feynman terminológiája) technológia még energiatakarékos is lehet, az netán még abban is segít, hogy az emberi civilizáció üzemmenete közelebb jusson egy, a fennmaradását biztosítani képes formához. A földi, főleg a növényi élet hosszú múltja bizonyítja, hogy a „valósidejűen" (real time) napenergiához kötött „termelés-fogyasztás" (mondhatjuk: „Nap-élet") tartósan életképes és önfenntartó. Az állati élet már némileg eltávolít ettől az azonnali hasznosulástól, és az emberi életforma, pláne a túlszaporodás esetén mindezt a visszájára is fordíthatja. Nos, a Nap-élethez kellene minél inkább közelítenünk, persze a XXI-XXII. századi tudás szintjén, tízmilliárdos emberi létszámmal és a maximálisan megőrzött környezettel, amelynek modell-rendszerkénti fenntartása is életbevágó! Ez a XXI. század legfőbb kihívása.

Nem akarok vakon elfogultnak látszani a nanotechnológia irányában. Azt a látszatot sem akarom kelteni, hogy minden termelési-reciklizációs gond így oldható meg – hiszen vannak területek, például a közlekedés, amely aligha szabadítható meg a problémáktól nanotechnológiai molekuláris gépekkel – hasonlókkal, mint az E. coli csillója…

Problémának látom azt is, hogy a nanotechnológia „termelése" nélkülözi azt a minőségbiztosítási lehetőséget, amelyet a *Total Quality Management* (TQM) jelent a mai termeléscentrikus világban, illetve amelyet az élővilágban az evolúció eszközei hordoznak: az önreprodukció még csak megy – ez az, amiről ma a szakma leginkább beszél –, a mutációk (azaz a „majdnem selejt") fellépte is kézenfekvő. Amit azonban nehezen tudok elképzelni, az a kiválogatódás „gyorsított" változata, amely a TQM-et lenne hivatott helyettesíteni. Főleg a mindenbe belezavaró, elsősorban termikus zajok minimalizálása látszik – elvileg is – problematikusnak. De hát hadd legyen még mit kutatni egy induló tudományban…

Magát a nanotechnológiát, annak indulását az integrált áramkörök fejlődése provokálta: Gordon Moore-nak, az Intel kereskedelmi igazgatójának a hetvenes években készített üzleti terve révén, amely „törvénnyé" érett. A példátlan tempójú miniatürizálás a végéhez közeledni látszik. Az extrapolálás arra a következtetésre vezet, hogy a 2010-es évtized közepén elérjük az egyedi tranzisztorokra alapozott integrált áramköri koncepció fizikai határait, hiszen nem lesz elegendő atom egy-egy tranzisztorban a kapcsolóhatás létrejöttéhez. Emiatt kezdett a kilencvenes években a szakma azon spekulálni, hogy mi is történik ezt követően, mert a fejlődés lefékeződésére senki sem fogad.

A kérdés időszerűsége 2003-ban már nagyon is komoly. Ha a saját élményemből indulok ki, akkor ezt a gondot meg kell az olvasóval osztanom. A Cornell Egyetem Anyagtudományi Karán dolgoztam 1986-ban, amikor az ottani National Submicron Facility-ben elkészültek a világ első, 100 nm-es kapuelektródájú tranzisztorainak példányai. Üzemképes azonban alig akadt közöttük. Össze is hívtak a kollégák egy szűk szakértői megbeszélést, hogy ötletekkel segítsük a kihozatal megjavítását. Nos, tessék az évszámra figyelni: a 100 nm-es tranzisztort tartalmazó áramkörök először 2001 táján jelentek meg tömegtermékként. Ha a tizenöt évet – mondjuk – tízre lerövidíthetőnek is érzem, mindebből az következik, hogy a 2015. táján lezáródó tranzisztor-korszakot követő új megoldásoknak már laboratóriumi szinten bizonyítottan itt kellene lappanganiuk. Ennek analízise azonban néhány további folyóiratcikk témája lehetne.

[4] Tanaka, Kentaro –Tengeiji, Atsushi –Kato, Tatsuhisa –Toyama, Namiki – Shionoya, Mitsuhiko (2003): A Discrete Self-Assembled Metal Array in Artificial DNA**.** Science. 21 February. **299**. 1212-1213.

Az efféle meggondolások indították el talán tíz esztendeje a kvantumszámítógép-kutatásokat. De nemhogy zseniális trónkövetelő, de potenciális utód is csak a megszokott rendszer „rokonságából" látszik. Azaz csak a bizonyos pontokon megújított integrált áramkör látszik esélyesnek. Például a mai, chipen belüli vezetékhálózat helyett képzelhető el ugyanott a gyorsabb és mégis kevesebb energiát disszipáló optikai jelátvitel. Vagy az ún. egyelektron tranzisztor ért el tárgyalható fejlettséget. A kettős állapotokat jól modellező, spinekre alapozó izgalmas megoldások vagy a magashőmérsékleti szupravezetők alkalmazása még nem látható a gyárthatóság horizontján. Kissé ellentmond ennek, hogy épp a napokban vettem részt egy konferencián, ahol irigyelt, de jó barátaim ismertették egyik kísérletüket, amely a szilícium és annak technológiája alapján – azaz a nyerésre legesélyesebb stratégiával – készítettek modellértékű kvantumkomputert. Ez a megoldás néhány, egymáshoz kapcsoltan, azaz néhány atomnyi távolságra ionimplantált foszforatom spinjére épít.

A katonai kutatásokban a „megfejthetetlen" titkosírások, a kriptográfia követelményei vezettek el a kvantumszámítógép gondolatához. A méretcsökkenéssel ugyanis eljutunk oda, hogy az áramköri rendszerben a kvantummechanika veszi át a newtoni törvények szerepét. Elsősorban a Pauli-féle kizárási elv a főszereplő. Ez azt mondja ki, hogy egy egységes kvantummechanikai rendszerben, azaz olyan rendszerben, amelyben a részecskék kölcsönhatásban vannak, nem kerülhet két vagy több elektron azonos energiaállapotba (ebbe a spinjeik is beleértendők). Az ilyen egyedi állapotok, az ún. kvantumállapotok szuperpozíciói, azaz kombinációi is lehetséges állapotok. Az ilyen szuperponált állapotokat nevezték el – a digitális elektronika bitjeinek analógiájára – *qubitnek*. E káoszból az információ kiolvasása rejtélyét számomra legjobban a fénynek egy résen való áthaladása világította meg: a rés előtt a fényhullámban rengeteg kvantumállapot lappang – mint a qubitben –, a résen való áthaladás után azonban csak egyetlen hullámfüggvény manifesztálódik.

Annak ellenére, hogy az indíttatás az integrált áramkörök oldaláról indult, és az informatika új korszaka igényli a nanoméretű eszközöket, nagy esély van arra, hogy a kémiai, biológiai alkalmazások jutnak túlsúlyhoz. Ezeknek a tudományoknak az érdeklődési területe, logikája ugyanis közel áll a nanotechnológiáéhoz.

A magyarországi nanotechnológiai kutatások indulása seregnyi olyan példához hasonlatos, amelyeknél a hazai kutatógárda jó időben „rástartolt" egy-egy izgalmas, induló irányra. Sokan, akiknek a kísérleti lehetőségei és elméleti tudása ezt lehetővé tette, megindultak ebbe az irányba. Ahogy ez megszokott, a külföldi kapcsolatok is jelentős szerepet kaptak az irányváltásban.

E *Bevezetõ* első részében kifejtett filozófia hátterével igyekeztünk szerkesztőként összegyűjteni a hazai eredményeket – felkérve kiváló kutatótársainkat munkájuk bemutatására. Örömmel és büszkén mutattuk volna be a teljes hazai palettát. Ebben azonban mind a terjedelmi korlátok, mind a tárgykör diffúz határai megakadályoztak.

A jelen összeállításban a mikrovilág felől kívánunk közeledni a témához, ezért tettük az első helyre Bársony István tanulmányát. Ezt követi a nanotechnológia információkezelési filozófiáját összefoglaló Csurgay Árpádnak az alapok tisztázásához is hozzásegítő tanulmánya. Az optikai alkalmazások rendkívül fontos részét képezik az információtechnológia terén alakuló nanotudománynak – erről tájékozódhatik a tisztelt Olvasó Kroó Norbert, valamint Czitrovszky Aladár tanulmányaiból. A nanoméretű „megmunkálások" terén is van hazai unikális eszköz, amelyet Barna Árpád és Menyhárd Miklós tanulmánya mutat be. Ezután következik a

nanotechnológia egyik forró területének, a különleges szénmódosulatoknak, elsősorban a szén nanocsövekkel kapcsolatos hazai eredmények összefoglalása Kónya Zoltán, B. Nagy János, Kiricsi Imre, valamint Biró László Péter tollából. A Beke Dezső, Erdélyi Zoltán, Szabó István és Cserháti Csaba által ismertetett munka a nanoméretekben rendezett szerkezetek anyagmozgásainak tanulmányozása terén elért eredményeiket foglalja össze. Itt kanyarodunk a kémiai indíttatású nanotechnológia felé Guczi László, Dékány Imre, valamint Kálmán Erika és Csanády Andrásné tanulmányai révén, hogy – a téma multidiszciplináris voltát megkoronázó példaként zárjuk a sort Damjanovich Sándor bio-nanotechnológiai eredményeinek ismertetésével.

Meg kell említenünk, hogy a Magyar Tudomány 2002. decemberi száma, Görög Sándor vendégszerkesztésében, már sok olyan cikket tartalmazott, amelyek némi fogalmazási hangsúlyeltolással – multidiszciplína, oh… – a jelen összeállításban is joggal helyet kaphattak volna. Talán a legközvetlenebbek: Tétényi Pál – Lázár Károly –Paál Zoltán – Simándi László: *Katalízis – tudomány és tecnológia*, Berkó András: *A felülettudománytól a nanotechnológiáig – reakciók tanulmányozása atomi léptékben*, Horváth István Tamás: *Zöld kémia*, Tóth Klára – Gyurcsányi E. Róbert: *Szenzorok az analitikai kémiában*.

Több tanulmány tárgya épül be az EU keretprogramjaiba, illetve a NKFP-Széchenyi projektekbe, több kutatást pedig az OTKA finanszíroz – jelezve a hazai kutatások megbecsültségét, sikerességét. Reméljük, hogy ez a továbbiakban is így marad, illetve tovább szélesedik.

A hazai élettudományi kutatások sok témája olyan, hogy azokat – külföldön – a nanotechnológiai kiemelt finanszírozás keretében „adnák el". Ezek – terjedelmi okokból is – hiányoznak a jelen számból. Mindennek megoldására javasoljuk, hogy a közeli jövőben ezeket a témákat összefoglaló tematikus szám kerüljön a Magyar Tudomány szerkesztőbizottsága elé, jóváhagyásra.

Köszönetnyilvánítás

A kötetet Szentgyörgyi Zsuzsa kedves és lelkes szerkesztői segítségével állítottam elő. Nagyon köszönöm Csurgay Árpád akadémikusnak a megjegyzéseit és a történeti részre vonatkozó adatait. Remélem továbbá, hogy a vezetésem melletti T43704 számú, illetve a részvételemmel folyó T043685 OTKA kutatásaink is profitálnak ezekből a gondolatokból.

Kulcsszavak: *nanotudomány, nanotechnológia kezdetei, nanotechnológia célja, nanotechnológia fõ kérdései, a nanotechnológia célszám összefoglalása*

MIKROGÉPÉSZETI ELJÁRÁSOKKAL A NANOTECHNOLÓGIA FELÉ

Bársony István

az MTA doktora, MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet – barsony@mfa.kfki.hu

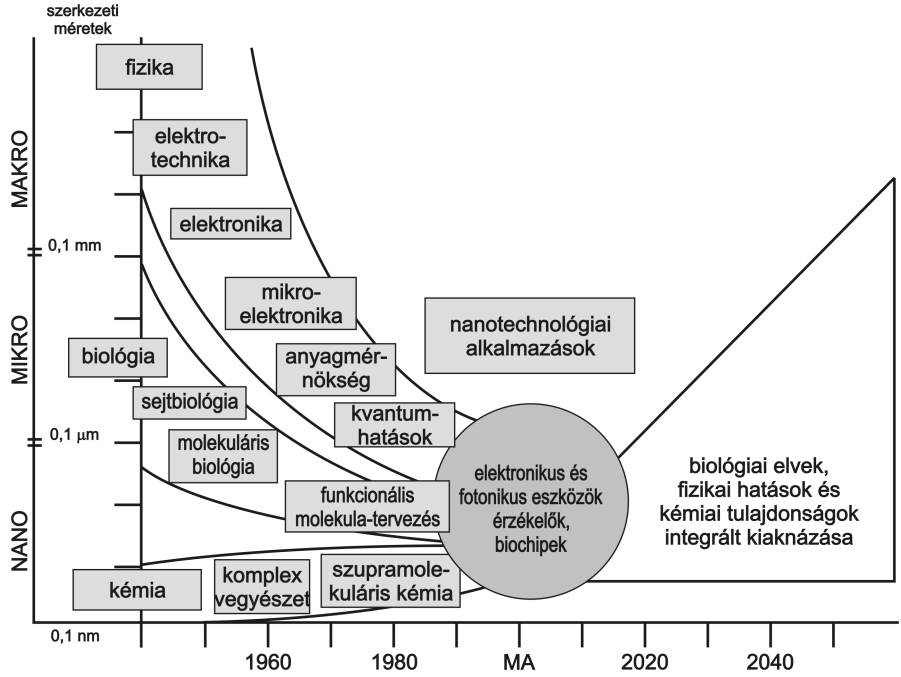
A mikro-elektro-mechanikai rendszerekben (Micro-Electro-Mechanical Systems – MEMS) mikrotechnológiai megoldások alkalmazásával egyetlen szilíciumchipen (lapka) valósul meg mechanikai elemek, érzékelők, beavatkozók és a jelfeldolgozó elektronika integrálása, a mikrométerestől milliméteresig terjedő mérettartományban. A mikromechanikai komponenseket, melyek az anyag szerkezeti-mechanikus tulajdonságait használják fel az eszközfunkció létrehozásában, ún. kompatibilis mikrogépészeti műveletekkel alakítják ki. Ennek során a szilíciumszelet – ilyenkor „hordozó"-nak nevezzük – egyes térfogatrészeit szelektív módon eltávolítják, azaz megmunkálják, „faragják". Így, a jobbára síkban építkező integrált áramköri (IC) technológiával szemben a mikrogépészetben a hordozót a harmadik dimenzióban is alakítják, valamint további szerkezeti rétegeket alkalmaznak az elektromechanikai működés megvalósítására.

A mikrogépészet és a Si-mikroelektronika együttes lehetőségeinek kiaknázásával a MEMS technológia már ma is meghatározó alaptechnológiává vált. Az érzékelés és vezérlés, beavatkozás egyetlen rendszeren belüli megvalósításával, az IC-k számítási képességét ötvözi a mikroérzékelés és -beavatkozás lehetőségeivel. Ebben a felfogásban az integrált áramköri részegység a MEMS „agya", amely a döntéshozatalhoz szükséges információt az „érzékszervektől", a különböző integrált jelátalakító szenzoroktól kapja. Egy konkrét folyamat vezérléséhez szükséges, általában mechanikai mozgással is egybekötött beavatkozást a „kezekkel", az integrált mikroaktuátorokkal hajtja végre. A környezetből gyűjtött információ mechanikai, elektromos, mágneses, termikus, optikai, kémiai és biológiai jellemzők mérése nyomán áll elő, míg a ***beavatkozás*** elmozdulással, pozicionálással, szivattyúzással, szűréssel, anyagáramlás szabályozásával összefüggő reakciót jelent.

A MEMS tehát mind a technológiai ***know-how***, mind a rendkívül szerteágazó alkalmazási területek vonatkozásában forradalmasítja az integrált eszközök fejlődését számos tudományos és technológiai területen: a pásztázó-szondás alagútmikroszkópiás (STM) technika területén, vagy az ún. biochipek alkalmazásával a veszélyes kémiai és biológiai reakciótermékek azonosításában, a polimeráz láncreakciókban (PCR) a DNS erősítésére és azonosítására, valamint a gyógyszerek hatékony, gyors, párhuzamos hatásmechanizmus-vizsgálata során a gyógyszerkutatásban. A MEMS eszközök az ipari termékekben egyre inkább meghatározó ***minőségi fokmérőként*** jelennek meg, hiszen korábban elképzelhetetlen szinergizmust valósítanak meg olyan, eddig kapcsolatba alig hozható területek között, mint például a biológia és a mikroelektronika. Ez az az áttörést jelentő pont, amely biztosítani fogja MEMS termékek világpiacának hosszú távú, ma éves szinten 50 %-ot is meghaladó növekedését.

A MEMS-technológia alapvetően azokon a módszereken és „szerszámokon” alapul, amelyekkel integrált mikroelektronikai szerkezetek alakíthatók ki. A MEMS-technológiák jó része kezdetben tehát mind anyagaiban, mind a felhasznált vékonyréteg technológiák vonatkozásában megegyezett a rézkarctechnika rokonságához tartozó, ún. fotolitográfiás, síkbeli ábrakialakítást alkalmazó Si-alapú integrált áramköri technológiákkal. A technológia komplexitásának növekedésével azonban egyre nagyobb számban jelentek meg olyan műveleti lépések, melyek nem részei az IC technológiai arzenálnak, bár kompatibilissé tehetők vele (azaz alkalmazásuk nem teszi tönkre az IC alapeljárás eredményességét). Ez a záloga ugyanis annak a lehetőségnek, hogy egyetlen chipen valósulhasson meg a rendszerszintű integráció, amit *System-On-Chip* néven szoktak emlegetni.

Le kell szögeznünk azonban, hogy *a MEMS technológiára nem hat az IC-fejlesztés hajtóerejét jelentő miniatürizálási nyomás, így az nem méretfüggő, és nem is kötődik kizárólagosan a* világon ma technológiailag legkiforrottabbnak tekinthető *szilícium technológiához*. A MEMS sokkal inkább tekinthető *gyártási filozófiának* a komplex elektromechanikai rendszereknek az IC-gyártáséhoz fogható, nagy termelékenységű előállítására. Rendelkezik azonban néhány, ma szinte felmérhetetlen előnnyel, úgymint az IC és szenzorika közötti határvonalak elmosása, valamint a megvalósítás- és alkalmazásbeli sokoldalúság. Az előbbi megkülönböztetés az IC-chipek valamint a makroérzékelők és -beavatkozók között korábban elsősorban az ár és megbízhatóság miatt volt jogos. A MEMS-technológia viszont megőrizte, átvette az IC-technológia gazdaságosságát és termelékenységi



1. ábra • A csökkenő méretek tartományában lezajlott evolúció, amely napjainkban a „nanotechnológia” megszületéséhez vezetett [1]. Ennek kapcsán a biológiai elvek, a fizikai törvények és kémiai tulajdonságok integrált felhasználásán alapuló jövőbeli alkalmazási lehetőségek szinte beláthatatlanok!

dominanciáját biztosító csoportos szeletkezelést. Bizonyos tömeges alkalmazásokban, hosszú távon, viszonylag alacsony fajlagos költséggel immár a MEMS-chipektől is az IC-kkel nagyságrendileg összevethető funkcionalitás, bonyolultság, integráltsági fok és megbízhatóság várható el. Ezt az állítást igazolja például a multifunkcionális, olcsó és megbízható MEMS alapú gyorsulásérzékelők robbanásszerű elterjedése a gépkocsik légzsákjainak gyártásában.

A MEMS-technológia tehát mára a termékszintű gyártás eszközévé vált. Mi a helyzet a nanotechnológiával?

A nanotechnológia születése kapcsán szokás Richard P. Feynman híres, 1959-es előadását idézni: *There's Plenty of Room at the Bottom, An Invitation to Enter a New Field of Physics* (Bőven van hely lefelé. Kedvcsináló a fizika új területének feltárására) [2]. Kivételes előrelátásra, vízióra vall, hogy még az integrált áramkörök megjelenése előtt, immár bő negyven éve megnevezte a méretek csökkentésének, azaz az integrációnak fő hajtóerejét: „Az információ nem terjedhet a fénysebességnél gyorsabban, így ahhoz, hogy számítógépeink egyre gyorsabban és precízebben működhessenek, egyre kisebb méretűekké kell válniuk". Megállapította, hogy *atomonkénti építkezéssel*, elképzelt minta szerinti elrendezésben (a kémiai stabilitással összhangban) *jobban befolyásolhatók az anyagtulajdonságok*. A tömeggyártás abszolút méretazonossággal (értsd „nanotechnológia"!) azonban csak százatomos méretben reális. Rámutatott, hogy a csökkenő méretekkel nem minden paraméter változik egyenes arányban, ezért merőben új problémák is adódnak (például a van der Waals-erők miatti összetapadás). Atomi szintű építkezéssel viszont *a kémiai és végül a biológiai szintézis* is megoldható. Ha a biológiai jelenségek analógiájára ismétlődő módon használjuk a kémiai erőket (önszerveződés)*, merõben új eredmények* (értsd „genetika-analóg") érhetők el. Eszerint a nanoméretek tartományában, az anyagszintézisen alapuló *bottom-up* építkezés esetében, ma még aligha beszélhetünk a szó szoros értelmében vett ipari szintű reprodukcióról, azaz „technológiáról". Bár a mikroelektronika kritikus méretei ma már a nanotartományba (<100 nm) esnek, az IC-technológia a réteges építkezést keveri a *top-down*, azaz lebontó, destruktív építkezés elvével. A „nanotechnológia", helyesebben a „nanotudomány" területén ma még a legfejlettebb társadalmakban is elsősorban az alapeszközök előállítása, a megfelelő szimulációs, manipulációs, preparációs és analitikai/mérési módszerek kutatása és fejlesztése van napirenden. Az atomi pontosságú gyártás megvalósításához ugyanis szükség van molekulaszintű manipulációra és szintézisre, valamit a mikro- és milliméter skálán működő technológiák összekapcsolására, hogy teljes egészében lefedhető legyen a nm-től mm-ig terjedő mérettartomány. A majdan előállított nanoszerkezetek kapcsolatát a makrovilággal ugyanis többszörös áttételen keresztül, mikro- és milliméter méretű eszközök közbeiktatásával lehet csupán elképzelni, ezért a problémát összetett módon, rendszerszinten kell kezelni.

A termékek miniatürizálásának trendje tehát (legalábbis kezdetben) korántsem azt jelenti, hogy valamennyi funkciót, amit eddig mikroméretben valósítottunk meg, ezután nanoskálán próbáljuk megvalósítani és ezáltal gyorsabbá, olcsóbbá tenni. Ellenkezőleg, *az önszervezõdés, a masszív párhuzamos rendszerek belépésével a* bottom-up *szintézis a „tradicionális"* top-down *technológiával, azaz destruktív módszerekkel gyártott eszközökben teremt lehetõséget új funkciók beillesztésére.* A nanoméretű gyártástechnológiák tehát elsősorban a *testre szabási követelmények kielégítésének eszközei lesznek* az információtechnológiában, az orvostudományban és a gyógyászatban, a

repülés- és űrkutatás, a gépkocsiipar, a környezet- és energiaipar területén használt MEMS eszközökben.

A nanotudomány számára most az a kihívás, hogy a miniatürizálás során érintett *valamennyi mérettartományban érvényes fizikai modellrendszereket* alkosson, melyek biztosítják a folytonosságot a méretkorlátok által szabott határok átlépésekor is. A molekulaszintű modellek képezik majd az alapját a számítógépes tervezésnek, aminek a komplex szoftver-hardver eszközeit (gép-operátor illesztési felületek, adatátadás, rendszerarchitektúrák) az elkövetkező években kell előállítani. *A mikro-nanoszintû fizikai méréstechnika, a hossz, tömeg és erõmérés megvalósítása ebben a mérettartományban szintén eminens feladata a tudománynak.* A szintézishez szükséges pontosságú pozicionálás, méretellenőrzés és gyártás megfelelő mérési etalonok segítségével válik elérhetővé. Ezeknek az etalonoknak az előállításánál viszont elengedhetetlen követelmény lesz az atomi pontosság biztosítása mind méretben és pozícióban, mind anyagszerkezetben. A majdani gyártásban döntő szerep jut a fenti etalonok segítségével vezérelt mikropozicionálóknak, mikro-tükör-blokkoknak, mikroérzékelőknek, mikroaktuátoroknak, mikroszerszám-rendszereknek. *A nanotechnológia tehát elképzelhetetlen adekvát MEMS-eszközök mint szerszámok alkalmazása nélkül!*

Egyes amerikai programok szerint (National Institute of Standards and Technologies, Gaithersburg, MD) a *molekulaszintû építkezés* legkézenfekvőbb módon optikai ellenőrző- és vezérlőeszközök beiktatásával valósulhat meg [3]. Az első lépés ezen az úton a szabálytalan alakú, mikrométeres és szubmikrométeres részecskék befogására, manipulálására és mérésére az integrált optikai rendszerek (optika, elektronika és szoftver) alkalmazása (például a lézercsipesz segítségével végrehajtott polimerizáció, amely mikron méretű, tetszőleges alakú, 3-dimenziós alakzatokat tud létrehozni és mozgatni, a Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézetének eredménye [4]). Ezeket a funkciókat, ismert elvek alapján már ma is integrálni lehet egy mindössze hitelkártyaméretű, nagypontosságú mikro-pozicionáló MEMS (MOEMS – mikro-opto-elektromechanikai rendszer) formájában. A szuszpendáltatott nanorészecskék transzportját szintén MEMS-eszközzel, egy mikro-folyadékadagoló (microfluidics) chippel célszerű megoldani. Az egyidejű processzálás igénye azonban megköveteli több párhuzamosan vezérelt lézercsipesz alkalmazását. Ezt a megsokszorozott működést egyetlen lézerforrás felhasználásával, MEMS mikrotükörhálózatokkal elért nyalábosztással, már demonstrálták [3]. A MEMS alapú optikai nyalábvezérlés egyébként a nanorészecskemanipuláció mellett fontos szerepet játszhat a mikroszkopikus, illetve veszélyes környezetben történő képi megjelenítésben is. Folyik annak a virtuális környezetnek a kialakítása, amelyik a vezérléshez a felhasználó számára megfelelő audiovizuális eszközökkel jelzi vissza a manipuláció során fellépő erőhatások mértékét.

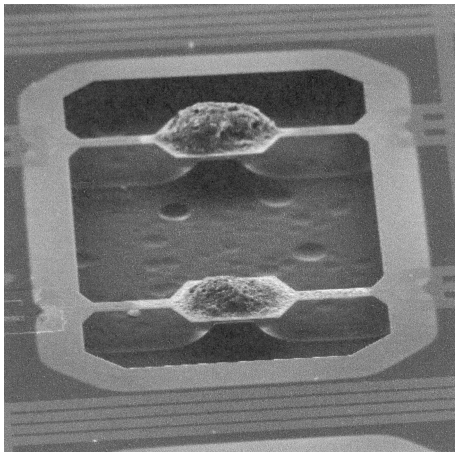
Pásztázó-szondás eljárásokkal való *atomi skálájú építkezésnél* elengedhetetlen lesz a felhasznált AFM csúcs egzakt minősítése. A nanomanipulációs szerszám (egyébként szintén MEMS-termék) geometriája pontos meghatározásának egyetlen ismert módja a téremissziós ionmikroszkópiával (FIM) megvalósított leképezés. A pontos pozicionálást a pásztázás során az atomok leszámlálásával képzelik el. Az atomtávolság meghatározását e célból már demonstrálták ultravákuumban működő STM-mel összeépített, pikométer felbontású Michelson interferométerrel.

A nanotechnológia és a MEMS „házassága" a szenzorika területén is minőségi javulást eredményez, sőt forradalmi változásokhoz vezet. Egy-egy eltérő példával szeret-

ném ezt megvilágítani a kémiai és a biológiai érzékelés területéről.

Az *integrált kémiai gázérzékelõ* MEMS-eszközök leggyakrabban használt anyaga a fémoxid-félvezető réteg, amelynek elektromos ellenállás változása követi a gázkörnyezet változásait. Ezek az ún. Taguchi-típusú szenzorok. Diffúziós folyamatok miatt azonban az eszköz beállása kellemetlenül lassú. Amennyiben a félvezető szemcsék átmérőjét sikerül a nanoméretek szintjéig csökkenteni, az eszköz jóval szélesebb tartományban vezérelhető, és a beállási sebesség is drasztikusan megnő.

A nanotechnológia alkalmazása a katalitikus folyamatok hatásfokának növelését is eredményezi. A *nanokatalízist* szintén hasznosítjuk gázérzékelő MEMS-alkalmazásokban, mind a Taguchi- típusú rétegek adalékolásánál, mind a kalorimetrikus elven működő gázérzékelésben. Látható tehát, hogy ebben az esetben is a nanoméretek



2. ábra • Az MTA MFA-ban pórusos Si mikrogépészeti eljárással kialakított, termikusan szigetelt, mechanikailag alátámasztott fűtőtest-párral megvalósított kalorimetrikus gázérzékelő elem éghető gázokra (mikropellisztor). A katalitikus égetést az aktív elem porózus bevonatában szuszpendáltatott, a kalcináció során aktivált nanoszemcsés Pt, Pd, Rh részecskék segítségével érjük el [5].

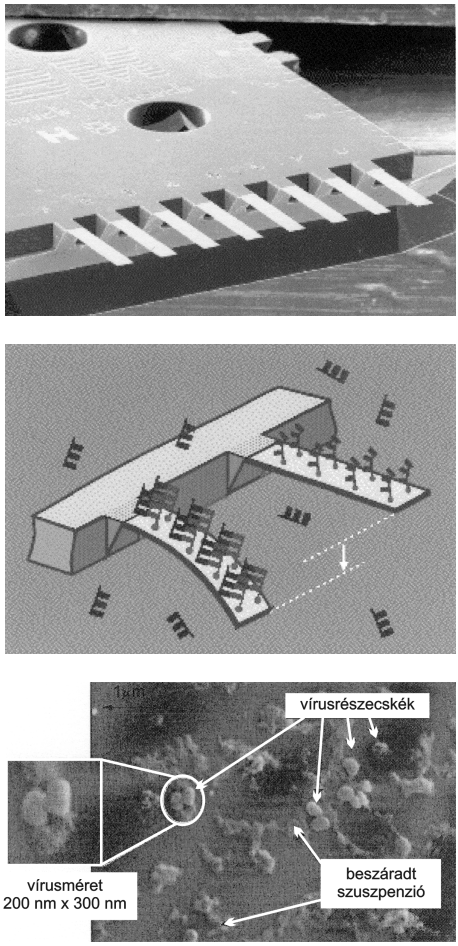
hordozta funkcionalitás hasznosításáról van szó MEMS-eszközökben [5].

A *bio-molekuláris mikrorendszerek*kel megvalósítható *molekulaszintû érzékelés* szintén intenzíven kutatott területe a nanoméretekkel is dolgozó MEMS-technológiának. A biomolekuláris mikrorendszerek három integráns eleme: ***a molekulaszintû felismerés, a jelátalakítás és a biofluidikus anyagok célba juttatása.*** Mindhárom területen szükség van kiterjedt modellezési és szimulációs erőfeszítésekre is az alapfolyamatok megértése és a kvantitatív tervezés támogatása céljából.

MEMS formában integrált biológiai érzékelés jobbára közvetett jelátalakítással, azaz valamilyen további fizikai/elektromos konverzió közbeiktatásával valósítható meg. A *3. ábrán* egy ilyen nanomechanikai detektálási elv vázlata és az eszköz fényképe látható [6]. A UCLA kutatói a MEMS-eszközben megvalósított nanovastagságú rezgőnyelvpár felületét megfelelő receptor-bevonattal érzékenyítették. Ha az egyik rezgőnyelv felületére jutatott oldatból a hibridizáció során a felismert molekulák kötődnek, míg a referencia-elektródára nem, akkor a két rezgőnyelv eltérő tömege miatt lehajlásuk, illetve rezonancia-frekvenciájuk között különbség mérhető. A vázlaton jelzett Δx eltérés a pásztázó-szondás módszereknél használt standard optikai nyalábeltérítés segítségével egyszerűen mérhető és a detektált molekula koncentrációegységeiben kalibrálható.

A biológiai detektálás sajátossága ugyanakkor, hogy a kémiai érzékeléssel szemben rendkívül szelektív. A biológusok rendelkeznek a molekuláris azonosításra megfelelő, nagyságrendi változásokat előidéző ligand-receptor felismerő rendszerekkel, mint az antitest-antigén, enzim-szubsztrát kölcsönhatások, a DNS-hibridizáció, ion-csatornák stb. A mikrorendszerekben nano-folyadékmennyiségek transzportjának megvalósítása nano-csatornák integrálásával szintén érde-

kes kutatási terület, különös tekintettel a biomembránok és nanoszerkezetű szűrők beiktatásának lehetőségére. Ezekkel az elemekkel komplett programozható biochipek illetve ún. egychipes laboratóriumok állíthatók elő, melyekre nem csak orvosdiagnosztikai és gyógyászati, hanem biztonsági és védelmi területeken is óriási az igény.



3. ábra • Feszültségmentes rezgőnyelves MEMS-szerkezetek minimális „erőkar" vastagsággal [6]. A rezonáns jelenségek, illetve az ellenállás-változáson alapuló (piezorezisztív) érzékelési elv alkalmazásával szinte molekulaszintű detektálás is lehetővé válik ilyen extrém érzékenységi tartományokban a felületen megkötött (középen), illetve a szuszpenzióból a felületre ülepített detektálandó „részecskék", organizmusok, sejtek esetében [7].

A nanotechnológia szerepe azonban nem csak miniatürizált eszközökben válik döntővé. A megújuló energiaforrások között eminens szerepet töltenek be a ***nagyfelületû napelemek***. A ma, polgári alkalmazásokban is elfogadható árú fényelemek (fotovoltaikus eszközök) 7-18 %-os hatásfokkal állítják elő az elektromos energiát. Ezt a napelemek konstrukciós kötöttségei korlátozzák, de az alapanyag, a bonyolult és drága vákuumtechnikai és félvezető megmunkálás miatt a fajlagos költségek sem csökkenthetők. A megoldást ismét a nanotechnológia ígéri. A Berkeley Egyetemen az Alivisatos csoport kutatói a jövő 50 %-ot is meghaladó konverziós hatásfokot ígérő energiaátalakító eszközeit ún**. *nanokompozit mûanyagok*** felhasználásával fejlesztik [8]. Ez nem csupán korszerű anyagok alkalmazását jelenti, hanem gyökeresen új működési elvek bevezetését is. A nagy mennyiségben gyártható, „filléres" kompozitréteg egyszerűen, „hidegen" felhordható a nagyfelületű, fémezett, akár flexibilis hordozóra, ami a tömeges elterjedéshez vezető fajlagos költségcsökkentést is elérhetővé teszi.

Hol van a hazai tudományos kutatásnak terepe ebben a szédületes tempójú fejlõdésben? Lehet-e a mi körülményeink között értelmes cél a „nanotechnológia" átfogó kutatása? Képes-e egy ilyen kis ország eredményesen hozzájárulni ennek az új világnak a megszületéséhez? Megannyi izgalmas kérdés, amire a fentiek olvastán első pillanatban lemondó kézlegyintés lehetne a válasz. Ambiciózus célokat viszont csak a megfelelően megválasztott módszerekkel és eszközökkel lehet elérni. Ez vonatkozik a nanoméretű rendszerek integrációjára is, ami valójában giga-feladat. A most kibontakozó fejlődés esszenciája a rendszerszintű integráció, ami a fenti kérdések helyes megválaszolásához

is megadja a kulcsot. *A nanotechnológiában az eredmények elérése elképzelhetetlen diszciplínákon, intézményeken, országhatárokon átívelõ, szoros együttmûködés, koordinált kutatási integráció nélkül*!

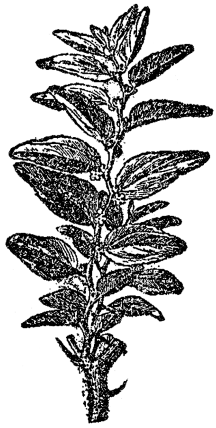
Ha ezt megértjük, és néhány szûk, de az adott vonatkozásban fontos részterületen sikerül magasszintû tudományos teljesítményt felmutatnunk, integrálódnunk a terület kulcslaboratóriumainak és iparvállalatainak vezetésével létrejövő nagy nemzetközi kezdeményezésekbe, akkor a ma még sporadikusan jelentkező, fragmentált hazai tudás és ötlet-morzsák hasznosulása is biztosítható a nemzetközi munkamegosztásban.

Az *MTA MFA* kutatásszerkezeténél, infrastrukturális, személyi és kapcsolati hátterénél fogva predesztinált arra, hogy egyik hazai zászlóvivője legyen ennek törekvésnek. A négyes osztatú tematikában, a vékonyréteg-, optikai-, mikro- és nanorendszerek kutatásában felmutatott eddigi teljesítményével, a megfelelő szoftveres (fizikai modellek, számítógépes szimuláció, képfeldolgozás) sikereivel és tapasztalatával kiegészítve, további, kellően intenzív nemzetközi kapcsolatteremtési aktivitás mellett néhány meghatározó területen jó esélyünk van a felzárkózásra illetve a megkapaszkodásra az élvonalban.

Kulcsszavak: *mikro-elektro-mechanikai rendszerek (MEMS), mikrogépészet, integrált kémiai gázérzékelõ, építkezõ – bottom up és lebontó – top down technológiák*

HIVATKOZÁSOK

[1] www.vdi.de (1998)
[2] www.zyvex.com/nanotech/feynman. html (1959)
[3] www.mel.nist.gov/proj/nm.htm (2002)
[4] www.szbk.u-szeged.hu/~gpeter/reversed/revrot. htm (2002)
[5] www.nmrc.ie/projects/safegas (2003)
[6] www.chem.ucla.edu/dept/Faculty/gimzewski/id11.htm (2002)
[7] www.ece.purdue.edu/~bashir/mems_index. html (2001)
[8] www.chemistry.berkeley.edu/index.shtml (2003)



ÁRAMKÖRELMÉLET A NANOELEKTRONIKÁBAN

Csurgay Árpád
az MTA rendes tagja, egyetemi tanár
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elméleti Villamosságtan Tanszék
Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológia Kar

Bevezetés

Nanos görögül törpét jelent. Egy ***nanométer*** a méter egymilliárdnyi (10^{-9}-ed) része. A néhányszor tíz nanométer nagyságú fém és félvezető ***nanorészecskéket*** a kémikusok és a fizikusok már közel száz éve tanulmányozzák. Mivel az atomok átmérője tized nanométer, a molekuláké pedig nanométer nagyságrendű, így a kémia mindig is ***nano-kémia*** volt, az atom- és molekula-fizikát illetve a ***mezoszkopikus*** fizikát pedig ***nano-fizikának*** is nevezhetnénk. A közelmúltig csak nanorészecske sokaságot és azt is csak statisztikai módszerekkel lehetett kísérlet tárgyává tenni.

Az 1980-as és 1990-es években a nanokémia és nano-fizika megkezdhette az ***egyedi*** nanorészecskék és ***egyedi*** molekulák világának birtokba vételét, mivel újfajta mikroszkópok és eljárások egész sora jelent meg. A pásztázó alagútmikroszkópok (Scanning Tunneling Microscope –ST) és az atomerő mikroszkópok (Atomic Force Microscope – AFM) már nem csak bepillantást engednek ebbe a világba (Sarid, 1994; Rohrer, 2000), hanem kialakulóban vannak eljárások az anyag nanométeres finomságú megmunkálására is. Évről évre új mérési eljárások és műszerek, valamint új megmunkálógépek születnek, új nanotechnológiai laboratóriumok épülnek.

A nanotechnológus még a mikroelektronikában is törpének számító építőelemekből szeretne gépeket szerelni. Szakmájának határait az elemek mérete alapján jelöli ki. Minden olyan eljárást a nanotechnológia tárgykörébe sorol, ami 50 nm-nél kisebb elemeket állít elő, ezeket vizsgálja, illetve használja valaminek az építésére. A nanotechnológus végső célja az, hogy egyedi atomokból, illetve molekulákból szerelje össze gépeit az élő természet tudományát ellesve. Gyulai József e folyóirat egyik korábbi számában elemezte a nanotechnológiáknak az elektronikus elven működő gépek bonyolultságára, a mikroelektronika fejlődésére és az alternatív nanoelektronika kibontakozására gyakorolt hatását (Gyulai, 2003; ***The 1999 Internat. Tech. Roadmap***).

A biokémiai folyamatok is a nanométerek világában zajlanak. Szemünk előtt bontakozik ki a nanotechnológia, a biotechnológia, az információs technológia és a kognitív tudomány egyre szorosabbá váló kölcsönhatása és e szakterületek konvergenciája. A National Science Foundation 2002 júniusában megrendezett ***Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (NBIC)*** konferenciáján az ebből fakadó szinergiákat elemezték. A nanotechnológia kibontakozását az Amerikai Egyesült Államokban nemzeti program ösztönzi (H. R. 766; Roco – Bainbridge, 2002).

Felmerül a kérdés, hogy miként állíthatók az ember szolgálatába a kibontakozó nanotechnológiák? Vajon hozzásegítenek-e a Nap energiájának jobb hatásfokú *learatásához* (energy harvest), különböző gép-bio csatlakozók (interfészek) építéséhez, újabb és újabb intelligens anyagok és nano-robotok kidolgozásához? E kérdésekre ma csak részleges válaszok adhatók, mert nincs elég ismeretünk magukról a törpékről, és még kevesebb az ismeretünk a törpék egymáshoz kapcsolásának módjairól, valamint az elképzelések szerint hasznosan működő törpe-csoportok építésének lehetőségeiről és korlátairól. Vagyis keveset tudunk még a törpékből építhető egyszerűbb és bonyolultabb felépítésű, kisebb vagy nagyobb szabású hasznos feladatokat ellátó nanogépek megvalósíthatóságáról.

Annyit tudunk, hogy

(I) a nanorészecskék belsejének dinamikája a *kvantummechanika* törvényeit követi,

(II) az elektronok dinamikája mindig együtt jár az atommagok *mechanikus* mozgásával is,

(III) a nanorészecskék között az *elektromágneses kölcsönhatás* a kizárólagos kapcsolatlétesítő erő.

A következőkben azt szeretném érzékeltetni, hogy megkezdődött a nanorészecskékből építkező géptervezés metodikáinak kidolgozása is. E munka egyik iránya az elektronikában nagy hagyománnyal rendelkező és bevált *áramkörelméleti paradigma* nanoelektronikai alkalmazása. Ennek keretében az elektromágneses erőkkel csatolt nanoeszközök és a belőlük felépíthető integrált rendszerek áramköri modelljeit kell tudnunk meghatározni.

Elektromágneses csatolású nanoáramkörök

A nanoelektronika eszközeinek egy része, különösen az 30-50 nm méretű eszközök – így a tervezérelt nano-tranzisztorok, a rezonáns alagút diódák (RTD) és az ún. egyelektron-tranzisztorok (SET) – fém kontaktusokon keresztül kapcsolódnak a külvilághoz. Ezek az eszközök hagyományosan áramkörré *huzalozhatók*. A kontaktusok és a huzalok hőtartályként viselkednek, ekvipotenciálisnak tekinthetők, így az áramkörökben a töltés- és energiamegmaradás Kirchhoff-egyenletei érvényesülnek. Az áramköri paradigma értelmében a nanoeszközök áramköri modelljeinek meghatározásához az eszközök belső kvantumjelenségeit kell modelleznünk, mert az eszközmodellek birtokában már az integrált rendszer modellje építhető fel a Kirchhoff-egyenletek segítségével. Az architektúra és a rendszertervezés pedig az elektronikai tervezés hagyományos áramkörelméleti módszereire építhető.

Az eszköz méreteinek csökkenése esetén azonban egyre nehezebb a fémes kontaktusok kialakítása és az eszközök rendszerré huzalozása. Elkerülhetetlen, hogy a huzalokban folyó áramok energiaveszteséget okozzanak, így a huzalozás válik a rendszerintegráció szűk keresztmetszetévé.

Alternatív megoldásnak kínálkozik a nanoeszközök erőtereinek csatolása. Minél kisebbek az eszközök és minél közelebb kerülnek egymáshoz, annál természetesebb megoldás az erőtér segítségével történő csatolás, ami egyben hozzájárul az energiaveszteségek lényeges csökkentéséhez is.

De az elektromágneses csatolású nanoeszközök – például félvezető *kvantumpöttyök*, nanomágnesek, molekulák vagy fém nanorészecskék – áramköri modelljeinek az eszközök közötti elektromágneses kölcsönhatását is le kell írniuk.

Nanomágnesek esetén maguknak az eszközöknek a mágneses tere kapcsolhatja egymáshoz a nanoeszközöket. Molekulákat az intermolekuláris erők – a molekulák Coulomb-erőtere – integrálhatják rendszerré. Parányi *nanoantennákkal* optikai

nanoeszközök is rendszerré integrálhatók. Megoldandó feladat az elektromágneses térrel csatolt és a hagyományosan huzalozott részáramkörök csatolásának modellezése is.

A nanoelektronika néhány részterületén már rendelkezünk a rendszertervezéshez szükséges áramköri modellekkel. Erőtérrel csatolt nanoelektronikai rendszerek architektúrája a közeli szomszédok csatolására épülő celluláris neurális/nemlineáris hálózatként (CNN) (Chua – Roska, 2002) építhető fel.

Az erőtérrel csatolt nanoeszközök modelljeit azzal a feltevéssel kerestük, hogy a nanorészecskék belső dinamikája a kvantumfizika törvényeit követi, de a részecskék közötti kölcsönhatás klasszikus elektrodinamikai modellekkel jól leírható.

A nanoeszköz (molekula vagy félvezető *kvantum-pöttyökből* [quantum dot] kialakított ún. *mesterséges molekula*) belső dinamikáját hőtartályhoz csatolt nyitott kvantum-rendszer állapotegyenleteivel írtuk le (May – Kühn, 1999; Stone, 1996). Feltételeztük, hogy a szomszédos eszközök hullámfüggvényei között nincs átlapolódás, így a közöttük fellépő kölcsönhatásokat az eszközök multipólusai (dipólusai, illetve kvadrupólusai) közötti erők közvetítik. A kidolgozott áramköri modell figyelembe veszi a rezonáns külső elektromágneses tér hatását is, így például jól írja le a molekula-dinamika optikai vezérlését is (Csurgay et al., 2000; Csurgay – Porod, 2001).

A modellben a nanoeszköz állapotát az elektronok (egyes esetekben a protonok) sűrűségmátrixa, illetve a vele egy-egy értelmű kapcsolatban lévő *koherencia vektora* jellemzi, míg a magok mechanikus rezgéseit a hely- illetve impulzus-koordináták adják meg, így az eszköz belső dinamikáját kevert, kvantum-klasszikus nemlineáris differenciálegyenletek írják le. Ha a koherencia vektor dimenziójához hozzáadjuk a magrezgés hely- és impulzus-koordinátáinak számát, akkor megkapjuk a nanoeszköz belső dinamikáját leíró nemlineáris áramkör állapotváltozóinak számát. A modell-áramkörben a koherencia vektor elemeit kondenzátortöltések, a mag-rezgéseket rezgőkörök jelenítik meg.

Két kvantumállapotú elektronikus és egy szabadságfokú mechanikus rezgést megjelenítő áramkör három, vezérelt generátorokkal csatolt kapacitásból és egy rezgőkörből áll. A belső dinamikus állapotváltozók száma tehát öt. Ha a kvantumállapotok száma n, és a magrezgések szabadságfoka f, akkor a nanoeszköz nemlineáris dinamikai állapotváltozóinak száma (n^2–1+2f).

Az eszközök közötti kölcsönhatás áramköri modelljeit klasszikus elektrodinamikai modellek alkotják.

Sikerült áramköri modellt adni tér-csatolt és fémkontaktussal ellátott eszközök közötti kölcsönhatás leírására is, és a modelleket sikeresen alkalmaztuk nanoelektronikai logikai kapuk és jelfeldolgozó processzorok tervezésére (Chua – Roska, 2002).

Az áramköri modellel jó közelítéssel leírható és szimulálható az eszközökön belüli exciton-, elektron- és proton-dinamika, beleértve az eszközön belüli alagutazásokat is. Szimulálható optikai pumpáló jellel megvilágított nanoáramkör is (Csurgay et al., 2000).

Az áramköri modellek hierarchikus felépítése lehetővé teszi, hogy az új nanoeszközökből felépített nagy bonyolultságú integrált rendszerek viselkedését is szimulálni tudjuk, ami nagyban elősegíti a nanoelektronikai integrált áramkörök fejlesztését.

Nanomágnesekből épített áramkörök

Az elektronsugaras litográfia lehetővé teszi, hogy egy szigetelő lapkán néhányszor tíz nanométeres mágneskorongokat mátrixszerűen helyezzünk el, és a korongok alakját, méretét, illetve egymástól mért távolságát céljainknak megfelelően alakítsuk.

Ferromágneses anyagokban az atomok elemi mágnesei – a spinek – négy erő hatására rendezkednek el és alakítják ki a kívülről is érzékelhető mágneses erőket. A négy különböző erő:

- a spinek mágneses dipólusai között ható erő,
- a kvantumfizikai eredetű kicserélési erő,
- az anizotrop erő és
- a külső mágneses erő.

A mágneses dipólusok között ható erő az elemi mágneseket ellentétes irányba (az északi pólushoz húzva a délit és fordítva) igyekszik beállítani. Ez az erő a dipólusok közötti távolsággal lassan (harmadik hatvánnyal) csökken. Az elemi mágneseket egy irányba tartani akaró kicserélési erő kis távolságok esetén nagyon erős, de a távolság növekedésével sokkal gyorsabban csökken, mint a dipólusok között ható erő. Az egymáshoz közeli spinek a kicserélési erő hatására egy irányba állnak be, ***mágneses domént*** hozva létre. Külső mágneses erőtér hiányában az egyes doménekben a mágnesezettség iránya véletlenszerűen alakul ki. Az anizotróp erő a mágnesezettséget kitüntetett irányba próbálja beállítani. A külső mágneses erőtér hozzáadódik a fenti három erőhöz, és így a spinre ható négy erő eredője fogja meghatározni az anyag belső mágnesezettségét. Amennyiben a mágneses részecske 1 nm-nél kisebb, a mágnesezettség dinamikája csak kvantummechanikai modellekkel írható le. Ha a méretek 1 nanométer és 1 mikron közé esnek, akkor a kvantummechnikai kicserélési erők is fenomenologikus erőknek tekinthetők, a doménfalak kialakulását és a mágnesezettség dinamikáját pedig térbeli mágneses kontinuum-egyenletekkel – a ***mikromágnesség*** Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenleteivel – nagy pontossággal írhatjuk le (Hubert – Schafer, 1998; Aharoni, 2000; Oti, 2000). A kicserélési erő kvantumfizikai eredete következtében e modellek kevert, kvantum-klasszikus dinamikát követnek.

Ha a nanomágnesek méretét olyan kicsire választjuk, hogy a kicserélési erő legyen a domináns, és így egy nanomágnesben csak egyetlen domén alakulhasson ki, ugyanakkor a korongok közötti távolság már elég nagy legyen ahhoz, hogy két korong között viszont a dipólus erő határozza meg a kölcsönhatást, akkor klasszikus mágneses erővel csatolt egydoménes nanomágnes-struktúrákat készíthetünk.

E kétdimenziós struktúrákban egy-egy nanomágnes kapcsolóként működhet (Csaba et al., 2003a). Ha a nanomágnesek méretét 10 és 60 nm közöttinek alakítjuk ki, akkor már elég kicsik ahhoz, hogy egydoménesnek legyenek tekinthetők, de még elég nagyok ahhoz, hogy a hőingadozásokkal szemben szobahőmérsékleten is stabilak maradjanak. A nanomágneseket áramszállal előállított mágneses tér vagy a szomszéd nanomágnes mágneses tere gerjeszti. A nanomágnes-mátrix kimeneteinek állapotát a kimenetnek kijelölt nanomágnesek mágneses terét érzékelő magnetorezisztív szenzor jeleníti meg.

A nanomágnes-áramkörök építőkockája egyetlen, téglatest alakú nanomágnes, amelyben két áramhurok egymásra merőleges mágneses teret gerjeszt, és amelynek dipólus terét szenzor méri. A téglatest szándékosan ***anizotrop***, ami azt jelenti, hogy sokkal könnyebben mágnesezhető a hosszabb oldala irányában, mint arra merőlegesen. A hosszabb oldal irányú mágneses teret generáló áramot tekintjük jelnek, az arra merőlegest generáló áram adhatja a külső ***pumpáló*** energiát, illetve digitális működés esetén az órajelet.

Csaba György kollégánk mutatta meg (Csaba et al., 2003b), hogy a nanomágnes, felhasználva a pumpáló teljesítményt, jelerősítőként működhet. E felismeréshez és a nanomágnesekből felépített logikai áramkörök tervezési metodikájának kidolgozásához a nanomágnes áramköri modellje vezetett el. A Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenle-

tekből kiindulva sikerült megadni a kétdimenziós mátrixot alkotó nanomágnesek áramköri modelljét, mégpedig úgy, hogy a modell nem függ attól, hogy a nanomágnes környezetében hol és milyen nanomágnesek, illetve áramhurkok helyezkednek el.

A nanomágnes áramköri modelljében a mágnesezettség vektorának komponenseit három nemlineáris induktivitás jeleníti meg. A külvilágot hat áramköri kapun keresztül látja a nanomágnes. E kapuk és a mágnesezettség vektora közötti kapcsolatokat, ill. az indukált feszültségeket a Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenletekből származtatott vezérelt generátorok és nemlineáris induktivitások jelenítik meg. A nemlineáris áramköri modell hűen írja le az egydoménes nanomágnes hiszterézis dinamikáját, és a külső mágneses tér változása nem változtatja meg a modellt, függetlenül attól, hogy a külső teret áramhurkok vagy szomszédos nanomágnesek hozzák-e létre.

Az egydoménes nanomágnesekből integrált nanoáramkörök építhetők. Az áramkört alkotó nanomágnesek számától függetlenül, a rendszerszimuláció alapját képező rendszermodellt az egyes nanomágnesek áramköri modelljeinek egyszerű összekapcsolásával nyerjük.

Au – Ag nanorészecskék: nanoantennák

A nanotechnológia új lehetőségeket nyit az integrált optikában is. Ugyanis a 10 és 50 nm közötti méretű nemesfém nanorészecskékben a vezetési sáv elektronjai kollektív rezgést végezve ***plazmonokat*** alkothatnak.

Megfelelő optikai gerjesztés esetén a nanorészecskék közeli erőtere a megvilágító tér sokszorosára nő, a szomszédos részecskék között erős csatolás alakul ki, így hullámterjedés indul meg a nanorészecskelánc mentén (Salerno et al., 2002). Meglepetést okoz, hogy a láncot alkotó nanorészecskék mérete sokkal kisebb, mint a lánc mentén terjedő optikai jel hullámhossza, a lánc sugárzási vesztesége és diszperziója nem jelentős. A lánc menti disszipációs energiaveszteség ugyan jelentős – előzetes becslések szerint hullámhosszanként a terjedő teljesítmény fele hővé alakul –, ennek ellenére e nemesfém nanorészecskéktől sokat vár az integrált optika. Nanorészecske-láncokból nemcsak optikai hullámvezetőt, de memóriacellát és kapcsolót is építettek (Brongersma et al., 2000).

A nanorészecske felületén az elektromágneses térerősség „drámai" megnövekedése azt eredményezi, hogy a plazmon rezonanciája érzékennyé válik a nanorészecske közelében megjelenő idegen mikrorészecskékre. Ez a jelenség új szenzorok építésében hasznosítható (Haes – Van Duyne, 2002). Áramköri modellek segíthetik az új szenzorokkal megvalósítható funkciók feltárását, intelligens szenzorok tervezését.

Utószó

A bevezetőben utaltam arra, hogy a kibontakozó nanotechnológiák hasznosítási lehetőségeiről és korlátairól ma még keveset tudunk. Nem tudunk eleget a törpékből építhető egyszerűbb és bonyolultabb felépítésű, kisebb vagy nagyobb szabású hasznos feladatokat ellátó nanogépek megvalósíthatóságáról. A nanokémia és nanofizika viszont egyre többet tud magukról a törpékről, egyre mélyebben tárja fel az e világban uralkodó törvényeket.

Ahhoz, hogy a törpék világát az embercsalád szolgálatába állítsuk, ez nagyon fontos, de ***nem elég***. Szükség van a tervezés és építés metodikájára is, szükség van nanotechnológusokra, nanomechanikusokra, nanoelektronikusokra is, és szükség van a realizálhatóság és a tervezés elméleti megalapozására is. Ebbe az irányba próbál egy lépést tenni a nanoelektronikai áramkörök elmélete.

Kulcsszavak: ***nanotechnológia, nanoelektronika, molekuláris áramkörök, elektromágneses kölcsönhatás, nanoantennák***

IRODALOM

Aharoni, Amikam (2000): *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Oxford University, Oxford

Brongersma, Mark L. et al. (2000): Electromagnetic Energy Transfer And Switching In Nanoparticle Chain Arrays Below The Diffraction Limit. Physical Review B, 62, **24**, December 2000, 16356-16359.

Chua, Leon O. – Roska Tamás (2002)*: Cellular Neural Networks and Visual Computing – Foundations and Applications*. Cambridge University Press

Csaba György – Imre A. – Bernstein, G. – Csurgay Á. I. – Porod, W. (2003b): *Circuit Simulations for Field-Coupled Single-Domain Nanomagnets.* Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design. ECCTD'03. Krakow, September 2003

Csaba György – Porod, Wolfgang – Csurgay Árpád I. (2003a): A Computing Architecture Composed of Field-coupled Single-domain Nanomagnets Clocked by Magnetic Fields. International Journal of Circuit Theory and Applications. 31, 67-82

Csurgay Árpád I. – Porod, Wolfgang – Lent, Craig S. (2000): Signal Processing with Near-neighbor Coupled Time-varying Quantum-dot Arrays. IEEE Transactions on Circuits and Systems. 47, **8**, 1212-1223

Csurgay Árpád I. – Porod, Wolfgang (2001): *Equivalent Circuit Representation of Arrays Composed of Coulomb-Coupled Nano-Scale Devices: Modeling, Simulation and Realizability*. International Journal of Circuit Theory and Applications. Special Issue on Nanoelectronc Circuits. January–February 2001, 3-37

Gyulai József (2003): Bonyolultság az elektronikában és a nanoelektronikában. Magyar Tudomány. 3. 300-307

H. R. 766, the Nanotechnology Research and Development Act of 2003, http://www.house.gov/science/press/108/108-054.htm

Haes, Amanda J. – Van Duyne, Richard P. (2002): A Nanoscale Optical Biosensor: Sensitivity and Selectivity of an Approach Based on the Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy of Triangular Silver Nanoparticles. Journal of the American Chemical Society. 124, 10596-10604.

Hubert, Alex – Schafer, Rudolp (1998): *Magnetic Domains*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg

May, Volkhard – Kühn, Oliver (1999)*: Charge and Energy Transfer Dynamics in Molecular Systems*. Wiley-VCH, Berlin

Oti, John O. (2000): Micromagnetics. in Webster John G. (ed.): *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering Online*. John Wiley.

Roco, Mihail C. – Bainbridge, William Sims (eds.) (2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (NBIC)*, Workshop organized by the National Science Foundation and Department of Commerce (DOC), Arlington, Virginia, June 2002.

Rohrer, Heinrich (2000): *Nanotechnology: back to the future of mechanics*, Plenary talk at the IEEE International Symposium of Circuits and Systems, ISCAS 2000, Geneva, May 28-31.

Salerno, Marco et al. (2002): Plasmon Polaritons in Metal Nanostructures: The Optoelectronic Route to Nanotechnology. Optoelectronics Review. 10, **3**, 217-224.

Sarid, Dror (1994): *Scanning Force Microscopy: with Applications to Electric, Magnetic, and Atomic Forces.* Oxford University Press, New York

Stone, Anthony J. (1996)*: The Theory of Intermolecular Forces*. Clarendon Press, Oxford

The 1999 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), and its 2000 Update. They are available at the International SEMATECH INTERNET web site http://public.itrs.net. Technology roadmap for Nanoelectronics, European Commission IST Programme, *Future and Emerging Technologies*, MELARI NANO, 1999.

FELÜLETI PLAZMONOK ÉS KÖZELI TÉR MIKROSZKÓPIA

Kroó Norbert

az MTA rendes tagja, az MTA főtitkára – kroo@office.mta.hu

A termelési technológiák jelentős hányadának ellenőrzése vizuális úton történik. Klasszikus esetekben ez egyszerű megfigyelésen, például a mérőeszközök leolvasásán alapul. A méretek csökkenésével azonban ez az egyszerű módszer már nem elegendő, ezért a minősítés alapvető eszközévé az optikai mikroszkóp vált. Az integrált áramköri eszközök első generációjánál például ez még jól működött, de az egyes áramköri elemek méreteinek folyamatos csökkenése e mikroszkópok felbontóképességének határait is túllépte. Ügyes technikai trükkökkel sikerült olyan optikai eszközöket létrehozni, amelyekkel a felbontóképesség határait (ezek az alkalmazott fény hullámhosszának nagyságrendjébe esnek) sikerült valamelyest kitolni, de mára már gyakorlatilag ezek a tartalékok is kimerültek.

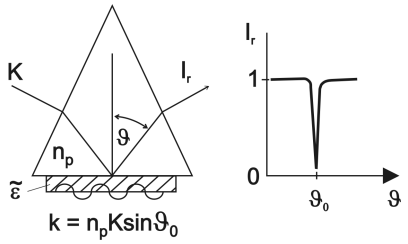
A méretcsökkenés azonban folytatódik. A kutatás a nanométeres méretek tartományát ostromolja, mind a „szerkezeti" anyagok, mind az elektronikus alkatrészek területén. Molekuláris méretű motorokban és tranzisztorokban gondolkodunk, és a nanométeres tartományban mozgó méretű szemcsékkel módosítjuk az anyagok tulajdonságait. Természetes az igény arra, hogy legyen olyan „mikroszkópunk", amelynek felbontóképessége ezen mérettartományba esik. Erre van lehetőség. Ennek egyik módja az, hogy olyan sugarakat (elektromágneses sugárzás, elektronok, neutronok, protonok, stb.) használunk, amelyek hullámhossza ebbe a tartományba esik (például a röntgensugárzáson alapuló vagy a nagyfeszültségű elektronmikroszkópok). Ezek alkalmazása azonban igen drága, speciális laboratóriumokat igényel, néha pedig még ezek sem segítenek. A másik módszer ugyanúgy látható fénnyel működik, mint a klasszikus mikroszkópok, de olyan megoldást alkalmaz, amelynél nem érvényes az a korlátozó feltétel, amely a felbontást a hullámhossz nagyságrendjében limitálja. Ez az úgynevezett közeli tér mikroszkópia.

Vizsgáljunk egy olyan felületet, amely igen finom szerkezetű felületi egyenetlenséggel jellemezhető. A vizsgálat látható fénnyel történik, és az egyenetlenségek mérete jóval kisebb a fény hullámhosszánál. A jelenség a Maxwell-egyenletekkel írható le – a felületen fellépő elektromágneses térnek két komponense van: egy térben terjedő és egy a felülethez kötött, attól távolodva exponenciálisan csökkenő térerősségű rész. Ez utóbbit evaneszcens térnek nevezzük. A klasszikus mikroszkópok az első komponenst használják ki. A térben terjedő (szórt) fényt a vizsgált tárgytól távol, a „távoli térben" gyűjtik össze, és így alkotnak képet. E módszer felbontóképességének szab határt a fény hullámhossza.

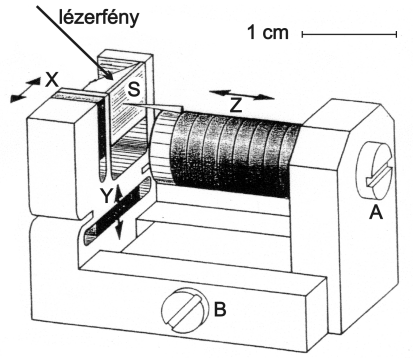
Az evaneszcens tér jelenléte a közeli tér mikroszkópia alapja. Ha ebbe a vizsgált felülethez közeli, az optikában „közeli térnek" nevezett tartományba egy, az alkalmazott fény hullámhosszához képest kisméretű

szondát helyezünk, ezen a közeli tér „szóródik", amit viszont már a távoli térben is detektálhatunk a hagyományos módszerekkel. Ez a szórt fény azonban megőrzi az evaneszcens tér felületi struktúráját, amely finomabb a hullámhossznál, vagyis a hullámhossz már nem korlátozza a „mikroszkóp" felbontóképességét. Ha ugyanis a szondát a felület mentén mozgatjuk, letapogathatjuk annak szerkezetét, és képet alkothatunk.

Az evaneszcens tér létrehozásának – fémfelületek esetén – az egyik tipikus módja az ún. felületi plazmonok gerjesztése lézerfény segítségével. Ezek a fémfelületen lévő vezetési elektronok kollektív mozgásához kapcsolódó elektronsűrűség-hullámok, melyek energiája megegyezik a gerjesztő fény fotonjainak energiájával, impulzusuk azonban nagyobb a fotonok impulzusánál, ezért direkt módon nem csatolódnak egymáshoz. Ha azonban a gerjesztő fényt egy, az egységnél nagyobb törésmutatójú közegben, például üvegen keresztül csatoljuk a (vékony) fémrétegbe, megfelelő szögben becsatolva a fényt, elérhető, hogy a fény impulzusának a felülettel párhuzamos komponense megegyezik az azonos energiájú felületi plazmon



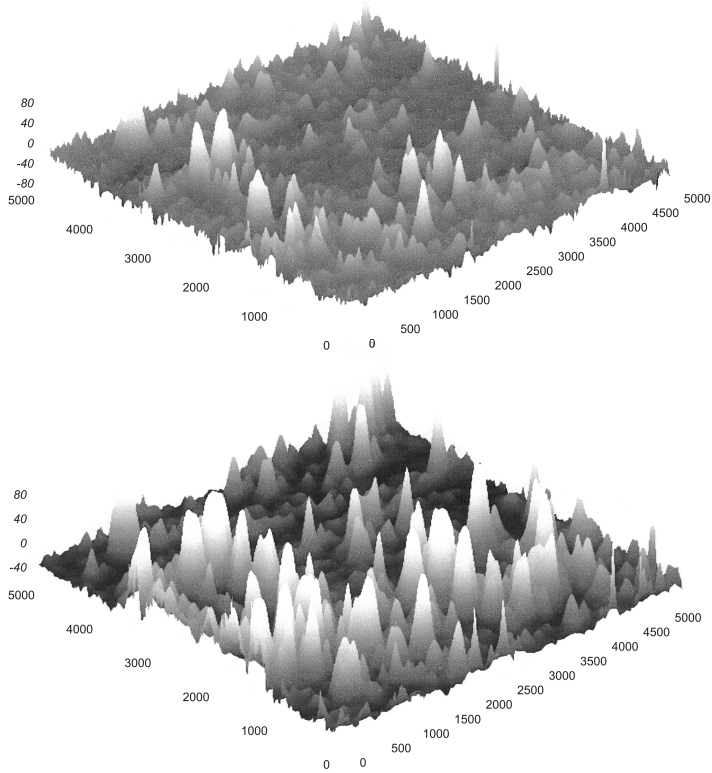
1. ábra • a) Felületi plazmonok gerjesztése $\tilde{\varepsilon}$ (komplex) dielektromos állandójú vékony fémrétegben n_p>1 törésmutatójú ε üvegprizmán keresztül. Alkalmas ϑ_0 szög esetén a fény K impulzusának a plazmonokkal párhuzamos komponense megegyezik ezek k impulzusával. Ekkor a b) ábra szerint a visszavert (teljes visszaverődés) fény intenzitása minimummal rendelkezik, mivel rezonencia jellegű plazmon-gerjesztés következett be. ε_0 ~1 a levegő dielektromos állandója.



2. ábra • Közeli tér pásztázó alagútmikroszkóp sematikus elrendezése. A lézerfény az S felületen gerjeszt felületi plazmonokat. Ezek közeli terét tapogatja le a *z* irányban mozgatható (piezokerámiára kapcsolt feszültséggel) fémtű. A pásztázás a minta *x* , *y* irányú mozgatásával történik, ugyancsak piezokerámiákra kapcsolt feszültséggel.

impulzusával. Ilyenkor rezonancia jellegű erős csatolás, vagyis nagy hatásfokú felületi plazmon-gerjesztés jön létre. *(1. ábra)* Tehát a foton-felületi plazmon-csatolás engedelmeskedik az energia- és impulzusmegmaradás törvényének.

A felületi plazmonok evaneszcens terébe helyezzük be azt a szondát, amely letapogatva az evaneszcens teret, képet alkot a felületről. Ez a kép természetesen nem adja vissza a felület topológiáját, ezt azonban szimultán külön is megmérhetjük. Erre alkalmassá tehető egy pásztázó alagútmikroszkóp, amelyben egy fémtű pásztázza végig a felületet úgy, hogy a tűnek a felülettől mért távolságát állandónak tartjuk. Ezt úgy érhetjük el, hogy a tűt egy piezokerámia rúdra erősítjük, és az erre kapcsolt feszültséget úgy változtatjuk, hogy az alagútmikroszkópon folyó áram állandó legyen. Ekkor a feszültségváltozás arányos a felület domborzatával. A pásztázó tű kirajzolja ezt a felületet, de egyúttal a közeli tér erősségének képét is. Ez pedig a felületnek a domborzattól eltérő, a felület fizikai állapotára jellemző képét jelenti, de a felület hőtérképe is meghatároz-



3. ábra • Egy vékony aranyrétegen létrehozott (tükör) felületi plazmonok evaneszcens terében felvett közeli tér mikroszkóp kép (a), illetve egy egyidejűleg felvett „hőmérsékleti" térkép (b).

ható, lényegében csak a tű geometriája által korlátozott felbontással. Ez optimális esetben akár 1 nm körüli érték is lehet. A mikroszkóp elvi vázlatát a *2. ábrán* lehet áttekinteni.

Ennek a mikroszkóp elrendezésnek egyszerűségén túl az is nagy előnye, hogy a lézerfény által létrehozott evaneszcens tér alagútáramot gerjeszt, amelyet a mikroszkóp felerősít, tehát erősítőként is működik. Ezenkívül a tű anyagának változtatásával különböző felületi tulajdonságok – amelyek a felület (lokális) kilépési munkájához, termoelektromos tulajdonságaihoz, stb. kötődnek – szelektíven jeleníthetők meg. *(3. ábra)*

Más módszerek is léteznek evaneszcens tér létrehozására, például olyanok is, amelyek nem fémes felület esetén is alkalmazhatók. Szondaként egy kihegyezett fényvezető szál vége is szolgálhat. A szonda által szórt evaneszcens térből eredő fény egy részét a fényvezető szál összegyűjti, és ez a távoli térben detektálható.

A leírtakon kívül is több variánsuk létezik a közeli tér mikroszkópoknak, amelyek a nanotechnológia alapvető fontosságú mérő- vagy minőségellenőrző eszközeivé, speciális esetekben pedig a technológiák fontos részeivé válhatnak.

Ehhez azonban egy sor olyan technikai problémát kell megoldanunk, amelyek akárcsak érintőleges tárgyalására ez a rövid ismertető nem adhat lehetőséget.

Kulcsszavak: *mikroszkópia, evaneszcens tér, foton-felületi plazmon csatolás, pásztázó alagútmikroszkóp*

NAGYFELBONTÁSÚ LÉZER-INTERFEROMETRIKUS FELÜLETVIZSGÁLÓ BERENDEZÉS A NANOTECHNOLÓGIA SZOLGÁLATÁBAN

Czitrovszky Aladár
az MTA doktora, tudományos tanácsadó
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Lézeralkalmazási Osztály
czitrovszky@sunserv.kfki.hu

Hámori András
tudományos főmunkatárs
MTA Műszaki Fizikai
és Anyagtudományi Kutatóintézet

Kiss Árpád
PhD, tudományos főmunkatárs
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Lézeralkalmazási Osztály

Pogány Lajos
PhD, tudományos főmunkatárs
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Fémkutatási Osztály

A cikkben egy nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgálati módszert és berendezést mutatunk be, amely a fényhullám fázisának interferometrikus detektálásával nanométer alatti transzverzális – a felületre merőleges – domborzati felbontást tesz lehetővé. Célunk – a *Nanotechnológia* című program keretén belül – egy olyan berendezés kifejlesztése, amely számos, csúcsparaméterekkel rendelkező új megoldást tartalmaz. A tervezett berendezés transzverzális felbontása kb. 0,1 nm, ami már az anyag mikrostrukturális paramétereivel is összemérhető (például az atomsíkok távolságával). A berendezés széleskörű alkalmazási lehetőséget nyújthat a különlegesen finom megmunkálású felületek (mikroelektronikai rétegek, memóriaegységek, optikai felületek, csörpölt lézertükrök, optikai szálak, stb.) minősítésénél, valamint számos olyan területen, ahol precíz technológiák megvalósítása a cél.

Bevezetés

Amikor James Watt 1776-ban, a birminghami üzletember Matthew Boulton megrendelésére, Wilkinson-esztergagépén megépítette az első gőzgépét (ezt *New Method for Lessening the Consumption of Steam and Fuel in Fire Engines* címmel szabadalmaztatta), az alkotóelemek megmunkálási pontossága alig érte el az 1 millimétert. A gőzgép hengerének átmérője 127 cm volt, teljesítménye nem haladta meg a néhány lóerőt, ennek ellenére a század végére már több mint ötszáz ilyen gép működött az angliai bányákban. A szemléletes összehasonlítás érdekében a későbbi gépeit úgy népszerűsítette, hogy ezekkel akár húsz ló munkáját is helyettesíteni lehet, ami lényeges megtakarítást jelentett (innen származik a lóerő, a teljesítmény ma is használt mértékegysége). Ha nem is olyan gyorsan, mint a mai számítástechnika, a gépgyártás és ezzel párhuzamosan a méréstechnika is fejlődött, mivel egy

adott tűrésű alkatrész legyártásához legalább egy nagyságrenddel pontosabb mérésre van szükség.

A múlt század második felében az egyre pontosabb méréseket már nem csak a gépgyártás igényelte, egyre több olyan technológia fejlődött ki, ahol a geometriai méretek meghatározása és a felületek minősítése a mikronos és mikron alatti tartományba tolódott. A felületek érdességének, síkszerűségének vagy görbületének minősítésére volt szükség a jó minőségű, reprodukálható mikroelektronikai rétegek technológiájának megalapozásához, optikai szálak létrehozásához, mechatronikai alkatrészek teszteléséhez és számos olyan technológia kifejlesztéséhez, amely a tömeggyártás igényei miatt nagy tőkét mozdított meg. Ez számottevő befektetéseket tett lehetővé a kapcsolódó iparágakba – főleg a méréstechnikai kutatásokba és fejlesztésekbe. Az elterjedt tömegtermékekből csak néhányat kiragadva – például a Ferrotec Co. (Szingapúr, www.ferrotec.com.sg) által gyártott winchesterek tárolólemeze fölött (annak forgása közben) a leolvasó és író fej néhány tized mikronra van a felülettől, a Philips CD RW író-olvasó egységében is hasonló pozicionálási követelmények vannak, csakúgy, mint a DVD-író berendezésekben. Ezek után el lehet képzelni, hogy a felületek minősítési követelményei bőven a nanométeres és az alatti tartományba esnek, ami a gépészet hőskorához képest egymilliószoros változást jelet.

A felületek minősítése terén erre a pontosságra jelenleg négy, egymástól eltérő technika képes:

- Röntgensugár diffrakció (X-ray Diffraction – XRD),
- elektronmikroszkópia TEM (Transmission Electron Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscopy),
- atomi erő mikroszkópia, ami szintén pásztázó (scanning) módszerrel működik
- lézeres interferometria (Maudgal, 1998).

A fentiek közül az általunk évtizedek óta művelt lézeres interferometria nagy előnye, hogy a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából a többiekhez képest jóval egyszerűbb, a minta nem igényel előkészítést (mint például az elektronmikroszkópiában), a mérés érintésmentesen történik, az adatok viszonylag nagy felületről egyszerre jelennek meg, azonnal kiértékelhetők és abszolút méretmeghatározást tesznek lehetővé, mivel a hosszmérték maga a lézerfény jól definiálható, stabilizált hullámhossza. További előnyt jelent, hogy a minta topológiája három dimenzióban közvetlenül jeleníthető meg.

A mérés elve azon alapul, hogy egy kettéosztott koherens fényhullám egyik részét a vizsgálandó felületre irányítjuk, majd az onnan visszaverődő fényt (amelynek a hullámfrontját a felület egyenetlenségei torzítják) összehasonlítjuk (összelebegtetjük, illetve interferáltatjuk) annak a másik részével (amely ideális esetben nem szenvedett változást), és a két fényhullám eredőjéből meghatározzuk az összeadott hullámfrontban a felület által okozott perturbációk mértékét. Olyan interferométert, amellyel az egyik ág geometriai elmozdulásait lehetett mérni, először Albert A. Michelson épített 1881-ben (1907-ben kapott érte Nobel-díjat), később többen építettek hasonló berendezéseket, kimondottan felületek profiljának – érdességi paramétereinek, síkszerűségének vagy görbületeinek – vizsgálatára. Az ilyen interferométerekben az interferencia során az összeadandó hullámfrontok eredményeként kialakuló intenzitásmaximumok és -minimumok közti távolság a fényhullámhossz felének felel meg (piros fény esetén ez kb. 300 nm), detektálni pedig ennek a töredékét is lehet, ezért a mérés a felület fényhullámmal történő „letapogatásához" hasonlítható, melynek során a mérőág hullámfront torzulásának mértéke hordozza a transzverzális felületi egyenetlenségekre jellemző információt. A hullámfront-torzulás mértékét

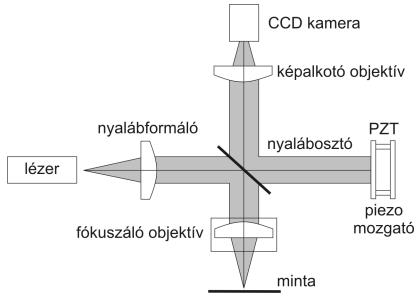
különböző fázisdetektálási módszerekkel közvetlenül a fél-hullámhossz ezredrészének megfelelő felbontással is le lehet mérni, amit még tovább lehet fokozni. Mint minden nagy pontosságú mérés, ez is nagyon komoly követelményeket támaszt egy olyan mérőrendszerrel szemben, amellyel a felületek nanométer alatti vizsgálatát kívánjuk megvalósítani (a mérést befolyásoló paraméterek pontos ismerete és azok stabilitása igen lényeges). A továbbiakban, az Intézetünkben a Nemzeti Kutatás Fejlesztési Program keretén belül fejlesztett mérőrendszer működési elvét, felépítését, egyes részegységeit és az elkészült laboratóriumi mintapéldányt, valamint annak lehetőségeit mutatjuk be, felvázolva a hazai és külföldi alkalmazásokat.

A felületvizsgáló lézeres interferométer működési elve és felépítése

A lézeres felületminősítő interferométereknek több fajtája létezik, ezek közül a leginkább flexibilis kétsugaras Twyman-Green interferométer (Born – Wolf, 1965; Das, 1991; Stitch – Bass, 1985; Lapp et al., 1987) módosított, fázis-siftelt változatát ismertetjük, amelyben egy különleges jelfeldolgozási módszert alkalmaztunk. A berendezés optikai részének egyszerűsített elrendezése sematikusan az ***1. ábrán*** látható. Itt a lézerből jövő fénysugár megfelelő nyalábformálás után kettéoszlik, egyik része egy referenciaágba, a másik a mérőágba kerül. A referenciaágban a fényhullám fázisát egy piezo-mozgató (PZT) változtatja, a mérőágban pedig a minta felülete torzítja a beeső fényhullám fázisfrontját. A sugarak újraegyesülése után egy speciális CCD kamerával figyelhető meg az interferogram, amiből kiértékelhető a fázisváltozás, abból pedig a vizsgálandó felület profilja.

Ha ebben a rendszerben minden mérést háromszor végzünk el, közben a referenciaágban PZT-vel 0-p/2, p/2-p, p-3p/2 intervallumokban léptetve a fázist, akkor a jelet integrálva egy célszerű jelfeldolgozási módszerrel megkaphatjuk a mintafelület által okozott fázistorzulást. Ebből a fázistorzulásból kiszámolható a felület transzverzális domborzata. Fontos megemlíteni, hogy ebben az esetben a fázis csak modulo 2p-re határozható meg. Ha nagyobb a fázisváltozás, akkor ezt a szoftverrel kell korrigálni, feltételezve, hogy a fázisváltozás pontról pontra kisebb 2p-nél, mivel ez a következő interferencia csík tartományába esik. A módszer előnye, hogy érzéketlen a belépő fény intenzitáseloszlására, az interferencia láthatóságára (a maximumok és minimumok intenzitásának különbségére), valamint a minta reflexiós tulajdonságaira. Ezenkívül a szoftver levonja a minta esetleges dőlését, korrigálja a helytelen fókuszbeállítást (gömbi eltérés). A berendezésben változtatható a laterális felbontás (és a képméret) is a mérőági optika nagyításának módosításával. Ha a referenciaágban elhelyezett tükröt nagyon kis amplitúdóval rezgetjük, akkor a ***speckle*** (a koherens sugaraknak a térbeli fluktuációk miatt fellépő lokális intenzitásváltozása) is kiküszöbölhető. Ha az interferométer karjait nem pontosan egyforma hosszúra választjuk, akkor szükség van a lézer hullámhosszának stabilizálására.

A berendezésben alkalmazott He-Ne lézerekben (λ = 632,8 nm) a hullámhosszat – $\Delta\lambda/\lambda$ – 10^{-7} –10^{-8}-as értékre lehet stabilizálni, a rövid idejű (egy mérés alatti)



1. ábra • A Twyman-Green interferométer sematikus vázlata

stabilitás ennél egy nagyságrenddel is jobb lehet. Ebből adódik, hogy a hosszmérték (hullámhossz) instabilitásából származó hiba kb. 0, 006 nm. A másik hibaforrás a levegő turbulenciája által okozott törésmutató-változással kapcsolatos hullámfront-torzulás, amit nagymértékben lehet csökkenteni a légáramlás csökkentésével és több mérés eredményének átlagolásával. A mérési pontosságba beleszól még a mérőág és a referenciaág termikus változása is, amit jó hővezetésű, kis tágulási együtthatójú anyagok alkalmazásával lehet csökkenteni (Wolf, 1980; Wolf, 1994; Vikram, 1990; Thorlabs Catalog, 2003; Spindler-Hoyer Cattalog, 2002). A nanométeres és az alatti skálán történő méréseknél már nem elhanyagolhatóak a mintafelfogás közben fellépő mechanikai feszültségek sem, amit speciális mintafelfogókkal lehet csökkenteni, valamint a mérés közben fellépő vibrációk, melyeket rezgésmentes feltételek biztosításával lehet kiküszöbölni. Az interferenciakép megfigyeléséhez speciális CCD kamerát alkalmazunk, amely a szürke gradációkat 14 bites felbontással tudja regisztrálni, valamint egy általunk kifejlesztett kiértékelési módszert. Mivel az interferenciacsíkok közötti távolság 316,4 nm ($\lambda/2$), a fentiekből adódó maximális felbontás 0,019 nm. A mérési eredményt azonban egyéb mérési és kiértékelési hibák is befolyásolják – ilyen például a referencia fázistolás hibája (a PZT linearitása), a parazita interferencia, a referenciafelület pontossága, a detektorzaj, ami relatíve annál nagyobb, minél kisebb az intenzitás (ezért célszerű minél nagyobb teljesítményű lézert alkalmazni), a kvantálási hiba (főleg a kis láthatóság esetén), a fotodetektor nemlinearitása és a koherens zaj. A fentieken kívül a mérés pontosságába beleszólnak még az optikai rendszer hibái – a térbeli felbontás nemlinearitása, amely a leképző rendszer apertúrájától függ, az interferométer aberrációi, a nem kívánt reflexiók, valamint a szórt fény koherens összeadása az interferométerben terjedő lézerfénnyel. Anélkül, hogy belemennénk az összes hibaforrás részletes elemzésébe, megjegyezzük, hogy a felsorolt tényezők a becsült maximális felbontást akár több nagyságrenddel le tudják rontani, de ezek nagy részét ki lehet küszöbölni, vagy legalábbis nagymértékben csökkenteni lehet. Ha ezt megvalósítjuk, akkor a kifejlesztett rendszerben a 0,1 nm alatti felbontás is elérhető.

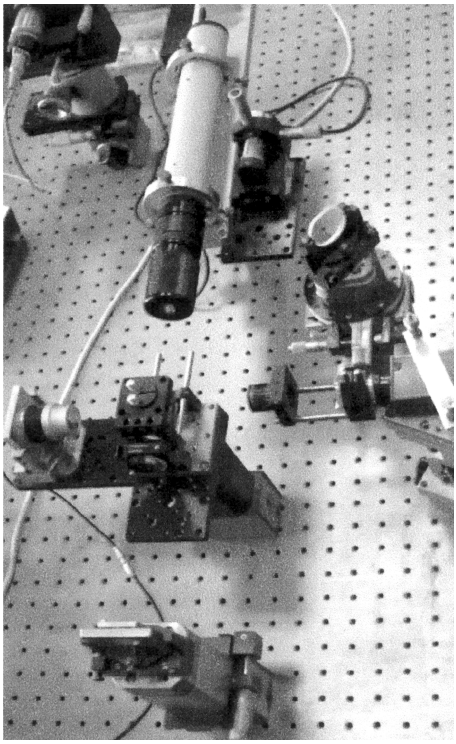
A megvalósuló berendezés

A *Nanotechnológia* című NKFP projekt keretén belül kifejlesztettük az ismertetett lézeres felületvizsgáló interferométer két verzióját, amely egy fázis-siftelt Twyman-Green interferométerre épült. A berendezéssel néhány mintán vizsgálatokat is végeztünk, bizonyítva az alkalmazhatóságát a kitűzött feladatra. Az első lépésben fényforrásként egy polarizált 3 mW-os He-Ne lézert alkalmaztunk, melynek divergenciáját nyalábtágítóval csökkentettük. Az interferometrikus egység referencia ágát, amelyben egy piezo-vezérelt tükröt használtunk, összeépítettük egy blokkba az osztóprizmával és a fókuszáló optikával. Ebben a változatban a leképező optika, az analizátor és a CCD detektor egy másik blokkban helyezkedett el, és külön mintatartóban volt a vizsgálandó felület is. A lézernyaláb közvetlenül a polarizációs osztóprizmára esett, és onnan került a két ágba *(2. ábra)*. A piezo-vezérelt referenciaág optikai úthosszát 10 nm-es léptékekben tudjuk változtatni, ami lehetővé tette a berendezés Z-irányú (transzverzális) felbontásának ellenőrzését és kalibrálását a fázissiftelt interferogramok változásának a kiértékelésén keresztül.

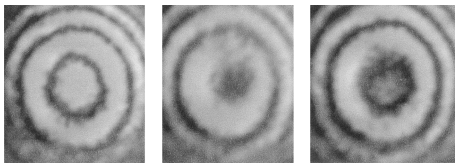
Ezt a változást pontonként egy másik, kis apertúrájú lineáris detektorral is megfigyeltük, az interferogram különböző pontjain regisztrálva az intenzitást. A CCD detektorra képezett interferogramokat számítógéppel dolgoztuk fel. A kapott adatokat

többféle módon értékeltük. Az X-Y irányú felbontást ismert minta-felülettel kalibráltuk, figyelembe véve a leképezés és a képmegjelenítés paramétereit. Jó minőségű sima felületeknél a Z-irányú (transzverzális) felületi változás egy csíkon belül volt, ami lehetővé tette a fázis-képpontintenzitás összefüggés direkt felhasználását. Ezzel már ebben a rendszerben is elérhető a nanométer alatti transzverzális felbontás. Szemléltetésül a *3. ábrán* az interferogramok változását mutatjuk be a mintafelület egy csíkon belüli transzverzális elmozdulása esetén, zajszűrés nélkül (zajszűréssel az interferogramok minősége nagymértékben javul).

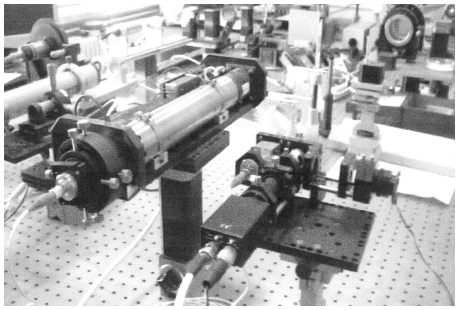
A berendezés következő változatában *(4. ábra)* egy frekvenciastabilizált lézert alkalmaztunk, melynek rövididejű (a mérés



2. ábra • A nagyfelbontású felületvizsgáló berendezés első változata polarizált He-Ne lézerre épülő változata



3. ábra • Az interferogramok változása a referencia ág piezo-mozgatóval történő egy csíkon belüli elmozdítása esetén, specle-szűrés nélkül

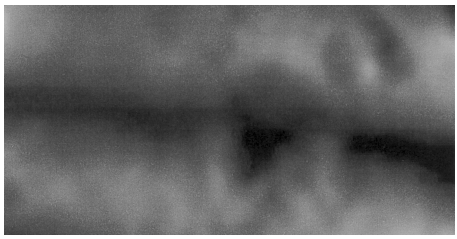


4. ábra • A lézeres interferometrikus felületvizsgáló berendezés. A stabilizált lézer sugara szál-optikán keresztül csatlakozik a mérőegységhez

alatti) relatív stabilitása meghaladta a 10^{-8} értéket.

Az interferometrikus egység optikai alkatrészeit egy blokkba építettük össze, csökkentve az egymáshoz viszonyított mechanikai elmozdulások és vibrációk lehetőségét. Ez a berendezés, amely a *4. ábrán* látható, egy nagyobb felbontású piezo-kerámiás referenciaágat tartalmaz, jobb minőségű tükrökkel és osztóprizmával. A szál-optika is javítja a bejövő nyalábminőséget, ami jobb nyalábformálást tesz lehetővé.

A zajszűrést első lépésben a referencia ág modulálásával végezzük. Az interferogramokat a referenciaág pozíciójának egy csíkon belüli eltolásával vettük fel – így differenciális jelfeldolgozással lehetővé vált az optikai alkatrészek fázisfront-torzításának bizonyos mértékű csökkentése (Gaál et al., 1993; Czitrovszky et al., 1987; Jani et al., 1990; Jani et al., 2000). Az interferogramok különböző kiértékelésének összehasonlítása, valamint az interferencia-csíkrendszer dina-



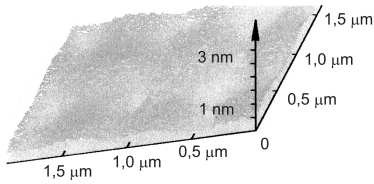
5. ábra • Egy csíkon belül torzult felület interferogramja

mikájának a tanulmányozása különböző mintafelületek esetén elősegítette a kiértékelő szoftver algoritmusának kifejlesztését. Egy jellegzetes, egy csíkon belül torzult felület interferogramját az *5. ábra* szemlélteti.

Jelenleg az új eszközök beszerzésével, az elektronikai és optomechanikai rendszer átépítésével párhuzamosan végezzük a berendezés következő verziójának kifejlesztését, amely sok szempontból felülmúlja az eddigieket. Ezzel együtt folytatjuk az adatfeldolgozó és kiértékelő szoftver fejlesztését, és annak adaptálását a mérési feladatokhoz.

Alkalmazási lehetõségek

A kifejlesztett berendezés mindenfajta szilárd felület vagy réteg háromdimenziós topológiájának vagy profiljának nagyfelbontású vizsgálatára alkalmas, ahol nanométeres vagy az alatti felbontásra van szükség. Ilyen feladat igen sok van, nemcsak a már említett



6. ábra • Egy általunk gyártott lézertükör felületének 3D-s topológiája. A fenti berendezéssel több más, hasonló jellegű felületi érdességű optikai réteget is vizsgáltunk.

esetekben (szerszámgépgyártás, mikroelektronika, száloptikák gyártástechnológiája, mechatronika, stb.), de az optikai technológia, a tribológia vagy más kutatási területen is. Hozzánk például a jó minőségű lézertükrök vagy más optikai vékonyrétegek minősítése, illetve a precíziós optikai elemek tesztelése áll közel. A felületek topológiájának és textúrájának jellemzése több paraméterrel történik, ezek közül az elterjedtebbek az R_a és R_z – amelyek az átlagos és a maximális felületi egyenetlenségeket jellemzik (a felületre merőlegesen), valamint a felületi síkszerűséget, hullámosságot és különböző görbületeket jellemző paraméterek. A feldolgozás módjától függően a kapott adathalmazból ezek mind kiszámolhatók, mi azonban egyelőre az R_a és R_z paraméterekkel foglalkozunk. Ezek kiértékelésére egy speciális szoftvert dolgoztunk ki, amely különböző módon jelenítheti meg az eredményt. Példaképpen a *6. ábrán* az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet Lézeralkalmazási Osztályának vékonyréteg laboratóriumában szuperpolírozott kvarchordozóra készült jó minőségű lézertükör felületének háromdimenziós topológiáját mutatjuk be. Ez a lézertükör egy BALZARS berendezésben elektronsugaras párologtatással készült. Mint látható, a felületnek 1 nmen belüli R_a átlagos érdessége van.

Köszönetnyilvánítás

A berendezés fejlesztői köszönetet mondanak az NKFP 3/064/2001 számú Nanotechnológia című projekt támogatásáért, ami lehetővé tette az ismertetett berendezés létrehozását.

Kulcsszavak: *interferometria, fázisdetektálás, felületi topológia nanoméretekben, képfeldolgozás, interferogram*

IRODALOM

Born, Max – Wolf, Emil (1965): *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford

Czitrovszky Aladár – Jani P. – Juhász P. – Vértes Á. (1987): Measurement Facilities on a Laser Ionization Mass Spectrometer. SPIE. 881, 103-107.

Das, Pankaj K. (1991): *Lasers and Optical Engineering*. Springer Verlag, New York

Dixon, Timothy H. (ed.) (1995): Interferometry and Surface Change Detection. Report of a Workshop Held in Boulder, Colorado: February 3-4, 1994.

Eom, TaeBong – Choi, T. – Lee, K. – Choi, H. – Lee, S. (2002): A Simple Method for the Compensation of the Nonlinearity in the Heterodyne Interferometers. Measurement Science and Technology. 13, 2, 222-225.

Gaál Péter – Jani Péter – Czitrovszky Aladár (1993): Proposed Data Aquisition Technique for Heterodyne Interferometers. Optical Engineering. 32, **10**, 2574-2577.

Jani Péter – Czitrovszky Aladár – Szótér L. (1990): Measurement Facilites and Accuracy Limits of Sampling Digital Interferometers, Proc. of IMECO Symp. on Measurement and Inspection in Industry. Preprint KFKI-1990-38/E. 33-40.

Jani Péter – Nagy A. – Lipp Z. – Czitrovszky A. (2000): Velosizer – A Photoncorrelation System. Journal of Aerosol Science. 31, 390-391.

Jani Péter (1986): Interferometry Applieded to Ceramics. Material Chemistry and Physics. 15, 333-346.

Lapp, Marshall – Stwalley, William C. – Kenney-Wallace, Geraldine A. (ed.) (1987): *Advances in Laser Science-II*. American Institute of Physics. Conference proceedings No. 160, New York

Lapp, Marshall – Stwalley, William C. – Kenney-Wallace, Geraldine A. (eds.) (1996): Advances in Laser Science, vol. II, part VII, Laser Diagnostics. American Institute of Physics, Conference Proceedings No 160, Seattle, WA.

Lawall John – Kassler Ernest (2000): Michelson Interferometry with 10 pm Accuracy. Review of Scientific Instruments. 71, 2669-2676.

Maudgal, Shubha – Sims, G. D. – Johnstone, J. E – Jennett, N.M. (1998): *Characterisation of Surface Roughness*. National Physical Laboratory, The UK's National Measurement Laboratory – Measurement note, May, 1998.

Spindler-Hoyer Cattalog. 2002

Stitch, M. L. – Bass, M. (ed.) (1985): *Laser Handbook*. North Holland, Amsterdam

Sutton Christopher M. (1987): Nonlinearity in the Length Measurement Using Heterodyne Laser Michelson Interferometry. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 20, 1290-1292.

Thorlabs Catalog on Optics, Electronics, Lasers and Fiber Optics. 2003.

Vikram, Chandra S. (ed.) (1990): *Holographic Particle Diagnostic*. SPIE Milestone Series. Vol. MS 21.

Wolf, Emil (ed.) (1980): *Progress in Optics*. vol. XVIII. North Holland, Amsterdam

Wolf, Emil (ed.) (1994): *Progress in Optics*. vol. XXXIII. Elsevier

Wu, Chien-ming – Lawall, John – Deslattes, Richard D. (1999): Heterodyne Interferometer with Subharmonic Periodic Nonlinearity. Applied Optics. 38, 4089-4094.

IONBOMBÁZÁS ÉS NANOTECHNOLÓGIA

Barna Árpád
az MTA doktora
barnaa@mfa.kfki.hu

Menyhárd Miklós
a fizikai tudomány doktora
menyhard@mfa.kfki.hu

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

Mint ennek a számnak a szerteágazó témái is mutatják, a nanorendszer alatt számos, egymástól méretben, tulajdonságban igen eltérő képződményt értünk. Szűkítve ezt a túl általános definíciót, a következőkben olyan rendszerek vizsgálatáról fogunk beszélni, amelyeknél egy vagy több dimenzió abba a nagyságrendbe esik, ahol az anyagi tulajdonság némileg vagy erősen megváltozik a tömbi tulajdonságokhoz képest. Nyilván ezek a tulajdonságváltozások azok, amelyek a nanoszerkezetek divatossá válását indokolják – olyan anyagokat tudunk létrehozni, amelyek tömbváltozatban nem léteznek.

Az iparban a legrégebben és tömegméretekben használt nanorendszerben az egyik dimenzió mikroszkopikus, a másik kettő viszont makroszkopikus, azaz vékonyrétegek. Szinte lehetetlen olyan napjainkban gyártott eszközt találni, amely nem használ vékonyréteget mint fontos segítő elemet. Ha már két dimenzió van a mikroszkopikus tartományban, akkor jutunk a nanohuzalokhoz, ide tartoznak a nanocsövek, stb., majd három mikroszkopikus méret esetén a nanorészecskékhez.

A nanorendszerek széles spektrumának megfelelően a vizsgálati metodikák igen változatosak. Ha van egyáltalán általános módszer, akkor az a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), aminek előnye vagy hátránya (például makroszkopikus minták vizsgálatánál), hogy nanométerű térfogatról ad szerkezeti, morfológiai és kémiai információt.

A TEM néhányszor 10 nm vastagságú mintát képes átvilágítani, de jó minőségű információt tud szolgáltatni már néhány nanométer vastag tartományról is. A laterális felbontás néhány tized nanométer is lehet. Ezek a méretek összeesnek a tetszőleges nanorendszerek méreteivel, ezért ideális eszköz a TEM a nanorendszerek vizsgálatára. A nanorendszerek azonban makroszkopikus formában jelennek meg, és ezekből a makroszkopikus mintákból kell készíteni a fenti vastagságú mintát a TEM-vizsgálathoz. Ennek az igen bonyolult feladatnak a legáltalánosabb megoldása az ionsugaras vékonyítás.

Szemben az elektronmikroszkópiával, egy nagyon speciális vékonyréteg-vizsgálati módszer az Auger mélységi feltérképezés, amely jelen formájában, megfelelő minták esetén, képes néhány atomi réteg vastag tartományok kémiai analizálására. Ebben az esetben is egy makroszkopikus mintát kell úgy kezelni, hogy az érdekes vékonyréteg a felületre kerüljön. Ehhez a művelethez is ionbombázást alkalmazunk.

A két módszer a közös vonása, hogy mindkettőnél a vizsgálat jóságát nem csak és főleg nem a mérőberendezés paraméterei, hanem a minta kialakításának minősége határozza meg. Tehát a nanorendszerek szerkezetkutatásában az ionbombázás igen előkelő helyet foglal el. Lássuk, miért?

A feladat, mint fent láttuk, az, hogy anyagot távolítsunk el egy felületről, de oly módon, hogy az esetlegesen sima felület eköz-

ben ne durvuljon sokat, a durva felület viszont simuljon ki. Itt számokat kell említeni. Egy tökéletesen tükröző felület a látható fény hullámhosszához képest sima. Ez néhány száz nanométer. De a nanorészecskék mérete néhány nanométer. Tehát egy szépen tükröző felület – nanoskálán – rendkívül durva is lehet. Az is könnyen belátható, hogy ha csiszolással szeretnénk létrehozni nanométeres durvaságú sima felületet, akkor a csiszolóanyagnak ebbe a tartományba kell esnie, ami nem mindig oldható meg, és még azzal is számolni kell, hogy bele is épülhet a felületbe. A kémiai marás alkalmazható, és vannak esetek, amikor alkalmazzák is, de itt is rengeteg a probléma a szelektivitással, a hibákra való érzékenységgel és főleg a végső, marószermentes felület kialakításával.

A nemesgáz ionokkal történő bombázás több problémát automatikusan old meg, de természetesen be is hoz új problémákat. A porlasztás lényegileg a felületi atomokat távolítja el, azaz ilyen értelemben a behatolása kicsi, és a nemesgáz bombázó ionok általában kémiailag nem kötődnek a bombázott anyaghoz. Ha megnézzük azonban egy polikristályos anyag felületét, amelyet szokásos ionbombázással marunk, tehát a beesési szög 45° és 60° között van, és az energia a szokásosan alkalmazott 1-5 kV, akkor azt látjuk, hogy a felület rendkívül durva lesz. Leginkább arra hasonlít, mint amikor egy folyó a puha kőzetbe mintázatot vág. Ennek oka az, hogy a porlasztási sebesség erősen függ az ionsugár és a krisztallit relatív orientációjának különbségétől. Súlyos problémákat okoz az is, hogy az eltávolított anyag egy része visszarakódik a felületre. Természetesen az is könnyen belátható, hogy adott szögviszonyoknál árnyékhatások fognak megjelenni, azaz lesznek olyan területek, ahova az ionok már nem tudnak behatolni, és lesznek olyanok, ahol a bombázás igen nagy hatékonyságú. Egy ilyen felület a fent vázolt feladatra természetesen abszolút alkalmatlan.

Ez az oka annak, hogy bár az ionvékonyítási módszert az ötvenes évektől alkalmazzák a TEM mintakészítéshez, az igazi áttörés a 80-as évek közepétől indult meg, csoportunk munkásságával (Barna, 1992; Barna et al., 1997) az ionsugaras vékonyítás területén. Ennek eredményeit azután az Auger mélységi feltérképezésben is átvettük (Barna – Menyhárd, 1994)

TEM minta készítése ionsugaras vékonyítással

Az ionbombázással történő mintavékonyítás ötlete igen egyszerű: bombázzuk a felületet, ennek hatására az anyag eltávozik, a minta vékonyabb lesz. A vékonyítás mértéke a belőtt ionok számával – ami könnyen szabályozható – arányos. Az ötlet megvalósítása azonban távolról sem egyszerű. A fő probléma abból ered, hogy az ionbombázás során a bombázott anyag eltávolítása csak az egyik folyamat. Sőt, ha azt tekintjük, hogy a belőtt energia mire fordítódik, meglepve tapasztaljuk, hogy nagyobb része az anyagban marad, ami ott nyilván változásokat okozhat. Hogy mennyi energia marad az anyagban, és az milyen változásokat okoz, az az ionbombázás körülményeitől függ. Érdekes módon, bár az ionbombázás igen régen ismert volt, a 80-as évek közepéig elég rossz eredményeket hozott. Ekkor kezdte Barna Árpád az ionvékonyításhoz kifejleszteni az ionágyút és vékonyítási metodikát. Hatására a módszer már igen jó minőségű mintákat állít elő (Barna, 1992; Barna et al., 1997).

Két oldalról közelítette a problémát, annak megfelelően, hogy az ionbombázás okozta változást is durván két részre lehet osztani: felületi morfológiaképződés és roncsolódás. Nyilvánvaló, hogy ez a két folyamat egymással kölcsönhatásban szimultán módon történik, mégis érdemes a tárgyalásukat különválasztani.

Az ionbombázás során történő felületi morfológia változása már igen régen ismert

volt, és sok elmélet született a jelenség leírására. Jelenlegi tudásunk szerint általánosan használható elmélet a jelenség leírására nincsen. Ugyanakkor Barna Árpád megmutatta, hogy ha a felülethez képest súrlódó (0,5-3° a felülethez képest) irányú ionokkal bombázzuk a felületet, és a mintákat eközben forgatjuk vagy billegtetjük, hogy a kristálytani irányok szerint átlagoljuk, akkor nagy felületű sima mintát lehet előállítani. Elméletének helyességét számos TEM minta léte bizonyítja, illetve az, hogy ez lett az ionvékonyítás „szabványos" elrendezése az egész világon. Így tehát a felületi morfológia létrejöttét a fenti módon sikerült korlátozni.

Természetesen továbbra is igaz, hogy az anyageltávolítás mellett ennél a geometriánál is jelentősen roncsolják az ionok a mintát. Ezt mindenképpen meg kell akadályozni, mert nem egy roncsolt réteget, hanem az eredeti mintát kívánjuk vizsgálni. Ennek csak egy módja van: az ionenergiát csökkenteni kell. Itt azonban azzal kerülnünk szembe, hogy az ionenergia csökkentésével az anyageltávolítási sebesség igen erősen csökken. Meg kell azt is jegyezni, hogy már súrlódó beesésénél is igen kicsi az anyageltávolítás sebessége. E két információt összegezve arra jutunk, hogy a jó TEM minta előállítása olyan ionbombázási körülményeket igényel, amelyek mellett nem lehet az anyagot eltávolítani. Ezt az ellentmondást oldja fel a TELETWIN ionágyú (Technoorg), amely olyan nagy sugáráramot biztosít, hogy ezen igen kedvezőtlen bombázási körülmények között is lehet mintát vékonyítani vele.

Megépítése után az ágyú azonnal az érdeklődés homlokterébe került, amit az is mutat, hogy az összes, ezzel a témával foglalkozó gyár átállt a Barna Árpád által javasolt elrendezésre. Ennek ellenére ma is TELETWIN ionágyú és annak fokozatosan megjelenő javított új típusai (Technoorg Linda, Budapest gyártmány) a lehető legjobbak, amit az is mutat, hogy a világon eddig már több mint háromszáz laboratóriumban használják őket.

A mikroszkópos mintakészítés legnagyobb kihívása a keresztmetszeti mintakészítés, amely a vékonyréteg-rendszerek illeszkedési, szerkezeti tulajdonságait hivatott feltárni. A mintakészítés általában a következő módon történik. A mintából két darabot vágunk ki, amelyeket egymással szembefordítva befogunk egy csiszolható közegbe. A mintát mechanikusan kezdjük el vékonyítani, majd elérve egy megfelelő vastagságot, kerül az ionvékonyítóba. Itt a mintát forgatjuk vagy billegtetjük, az ionnyalábot felülethez képest súrlódó beesésbe állítjuk be. A szög 2 és 0,5° között változhat, és a mintát mind a két oldaláról vékonyítjuk. Ez a művelet egészen addig történik, amíg a minta valamely pontján átlyukad. Ekkor megállítjuk az ionvékonyítást. A súrlódó szög és a forgatás vagy billegtetés eredményeképpen egy kis görbületű kráter alakul ki. Ez azt jelenti, hogy a mintánk rendkívül sima és a kialakult kráter igen nagy felületen egyenlő vastagságú rétegnek tekinthető. A vékonyítás konkrét körülményeitől függően a minta vastagsága a néhány nanométer és a néhány 10 nm-es tartományban van az elektronmikroszkópos vizsgálatok igényeinek megfelelően.

Térjünk vissza ahhoz a kérdéshez, hogy az ionbombázás mindenképpen visz-e be hibákat az anyagba. Amint már láttuk, a hibák két részre oszthatók, az egyik csoportba a morfológiai, a másikba pedig a minta térfogatában keletkező hibák sorolhatók. Az előbbi eljárás – tehát a súrlódó beesésű bombázás és a minta forgatása vagy billegtetése – egy sima felületet eredményez. Pontosabban a minta kezdeti durvaságától és a krisztallitok relatív orientációjának különbségétől függően a morfológia változik a réteg eltávolítása függvényében. Egy adott rétegvastagság eltávolítása után beáll egy stacionárius állapot, ami adott hullámossággal és durvasággal jellemezhető. A megfelelő bombázási

paraméterek kiválasztásával elérhető egy optimum. Ha a minta nem volt túl durva, és például egykristályos, akkor szinte atomosan sima felület érhető el. Polikristályos mintánál hullámos felület alakul ki, amelynek hullámosságát a kifejlesztett elméletünk alapján előre meg tudunk becsülni (Barna, 1992; Barna, 1997).

A másik problémaegyüttest a térfogatban kialakuló hibák jelentik, amelyek lehetnek ponthibák, Frenkel-hibák, stb. Több komponensű mintában keveredés történhet, azaz az egyik réteg atomjai átkerülhetnek a másik rétegbe és fordítva. A kristályszerkezet is deformálódhat. TEM-vizsgálatok esetében ez a hibás tartomány sokszor amorfizált rétegként jelenik meg. Mint említettük, a hiba azért keletkezik, mert a bombázó ionok energiájának döntő része nem porlasztásra fordítódik, hanem hibakeltésre. Bár a kölcsönhatási elméletek szerint a beesési szög súrlódáshoz való közelítésével a hibakeltés erősen redukálódik, azonban ez a megállapítás kísérleteink szerint 10^{o} súrlódó beesési szög alatt nem érvényes. Végső soron a hibakeltést csak egy módon tudjuk eredményesen csökkenteni: az ionenergiát minél kisebbre kell választani.

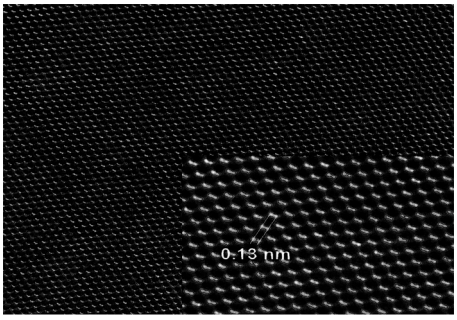
A minta-előállítási idő optimalizálása érdekében nagyenergiás ionokkal kezdjük a vékonyítást, ezzel távolítjuk el az anyag döntő részét, majd amikor a minta vékonysága a kívánt közelében van, akkor fokozatosan csökkentjük az ionenergiát, és már csak simítjuk a mintát. Az igen jó minőségű felület előállításához a befejező simítást néhány 100 eV-os ionnal végezzük el.

Az ionsugaras vékonyítás eredményeinek összefoglalása valójában lehetetlen, hiszen mint említettük, több mint háromszáz laboratóriumban használják ezeket a berendezéseket, ami azt jelenti, hogy világszerte hetente több száz mintát állítanak elő ezzel a módszerrel. Kiemelünk azonban néhányat a laboratórium eredményei közül.

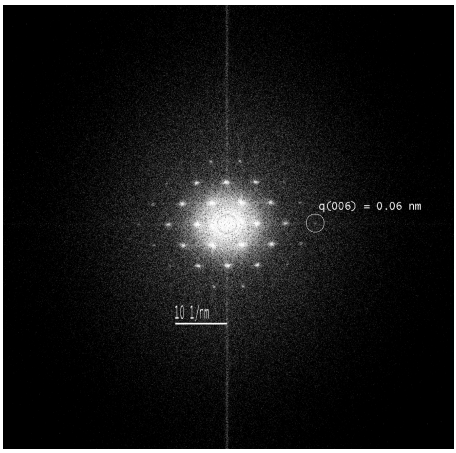
A kor követelményeinek megfelelően minden folyamatot automatizálni igyekszünk, kezdve a mosógéptől, az autókon keresztül a gyárakig. Az ehhez szükséges mikrochipek alapanyaga a szilícium. Az integrált áramkörök gyártása során rengeteg probléma merülhet fel, amelyek igen jelentős részét úgy próbálják megoldani, hogy elektronmikroszkóppal hibaanalízist végeznek. A minta-előállítás szinte kizárólag ionsugaras technikákkal történik.

A kutatók alapfeladata, hogy kiterjesszék ismereteink határait. Az elektronmikroszkóp atomoszlopok leképezésére alkalmas, persze csak akkor, ha nincs hibás réteg a vékonyított mintában. Az *1. ábra* az első olyan TEM felvétel, ami a szilícium hibamentes atomelrendezését mutatja. A mintavékonyítást berendezésünkkel végeztük. Mind a mintavékonyítás, mind a TEM felvétel a kaliforniai Berkeley-ben, a National Center for Electron Microscopy; Lawrance Berkeley National Laboratoryban készültek. Ugyanilyen valós szerkezetet mutatunk természetes gyémántról a *2. ábrán.*

Felvetődik a kérdés, mi történt a mintában kétségtelenül keletkező hibákkal? Ennek vizsgálatával foglalkoztunk egy másik cikkünkben (Barna et al., 1998), ahol azt vizsgáltuk, hogy a hibás, azaz a TEM szempontjából amorf réteg vastagsága hogyan függ az ionbombázás energiájától. Nagyon érdekes jelenséget tapasztaltunk. Azt vettük észre,



1. ábra



2. ábra

hogy az ionenergia csökkentésével az amorf réteg vastagsága egy ideig kiszámítható módon változik. Viszont ha az energia átlép egy küszöbértéket, akkor az amorf réteg vastagsága erőteljesebben csökken. Ezt csak úgy tudtuk magyarázni, hogy a hibás kristály még szobahőmérsékleten is képes a gyógyulásra. Ez valójában nem meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy a bombázással az egyensúlyitól igen távoli állapotot hozunk létre, amely az anyagnak nem kedvező, és így még szobahőmérsékleten is képes a kristályos állapot irányába történő változásokra. Valójában ez történik, amikor az ionenergiát 200-300 V-ra csökkentjük; ekkor anyagtól függően a roncsolt réteg vastagsága olyan kicsiny lesz, hogy mikroszkóppal már nem látható, és így az elektronmikroszkópos vizsgálatokat nem is befolyásolja. Valójában ez az a cél, amelynek érdekében ez a munka folyik.

Auger mélységi feltérképezés

Az Auger elektronspektroszkópia (AES) egy felületérzékeny analitikai módszer, melynek az a lényege, hogy elektronbombázással gerjesztjük az atomokat, amelyek jól definált energiájú Auger-elektronokat bocsátanak ki. Az intenzív Auger-vonalak az 50-1000 eV tartományba esnek. Az ilyen energiájú elektronok szabadúthossza a 0,5-1,5 nm nagyságrendbe esik, ami azt jelenti, hogy egy ilyen vastag rétegről hordoznak információt. Az AES megjelenésétől kezdve felmerült annak igénye, hogy ne csak a felületet, hanem a felület alatti tartományokat is vizsgálni tudjuk.

Az AES ultravákuum körülmények között működik, amelyben már kezdettől fogva használnak nemesgáz ionforrásokat. Ezek feladata atomi rétegek ionbombázással való eltávolítása. A korábbi megoldásokban az ionbombázási szöge 45-60°, az energia néhány 1000 eV volt, amiről már a 80-as években végzett kísérleteink kimutatták, hogy a vizsgálatok szempontjából a messze nem ideális tartományba esett.

Az Auger mélységi feltérképezés abból áll, hogy szakaszosan ionbombázzuk a felületet, és mérjük a frissen keletkezett felület AES spektrumát. A mélységi felbontás, azaz az észlelhető minimális határvastagság (a fenti bombázási körülményeket alkalmazva) nem volt túl jó. Érdekes módon, ahogy ez a tudományban nem ritka, az Auger mélységi feltérképezéssel foglalkozók nem ismerték az ionvékonyítási technológiát, és így azzal voltak inkább elfoglalva, hogy hogyan lehet az ionbombázás káros hatásait elméletileg leírni, mintsem az ionbombázás miként-jét megváltoztassák. Anton Zalar (Zalar, 1985) volt az első, aki átvette az ionvékonyításban már ismert egyik technikát, ami természetesen forradalmi javulást idézett elő az Auger mélységi profilírozásban is. Zalar a mintaforgatást vezette be, és egyedül már ez is azt eredményezte, hogy a mélységi felbontás jelentősen megjavult. Most már világosan értjük, hogy ez azért következett be, mert a káros morfológia kifejlődése jelentősen lecsökkent. Laboratóriumunkban rendelkezésre állt az ionvékonyításhoz kifejlesztett ionágyú. Ez elsődlegesen nem volt alkalmas az Auger spektrometriai alkalmazáshoz, ugyanis az ionvékonyítás nagyvákuum és

nem ultranagyvákuum körülmények között történik. Át kellett építeni tehát az ágyút az ultravákuum körülményeknek megfelelően. Ugyanakkor egy szokványos Auger-elektronspektroszkóp geometriai elrendezése nem engedi meg, hogy az ionbombázás az optimális feltételek mellett történjen. Ezért építettünk egy új kamrát, amelyben meg tudtuk valósítani a minta ionbombázás közbeni forgatását és a súrlódó beesésű ionbombázást úgy, hogy a bombázott felület *in situ* Auger-analízis helyzetben volt. Ebben a berendezésben nem csak Auger mélységi profilírozást lehet elvégezni, hanem valójában az ionbombázás során lezajlódó folyamatok egy részét *in situ* tudjuk vizsgálni. Ez azt eredményezte, hogy az ionbombázás során történő térfogati hiba keletkezésének mechanizmusait jobban megértettük, aminek egyik első eredménye volt, hogy meg tudtuk mondani, az ionenergia meddig csökkentendő. Megállapítottuk, hogy az ionkeveredés az ionenergia négyzetgyökétől függ, és így a kívánalmak függvényében ki lehet választani az optimális bombázási energiát. Természetesen mivel az Auger spektrometriában atomos szintű az érzékenységünk, a hibák sokkal súlyosabban jelentkeznek, mint az elektronmikroszkópnál. Ezért a hardver megváltoztatása mellett meg kellett változtatnunk a kiértékelési eljárást is.

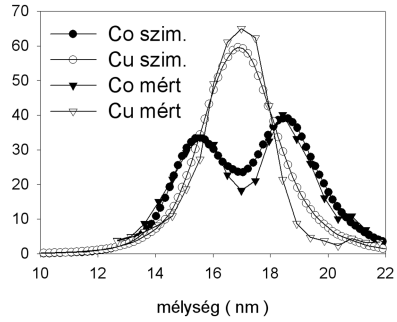
A mért Auger-intenzitás súlyozott átlaga az atomok mélység szerinti eloszlásának. Ez azt jelenti, hogy egy mért intenzitásmértékből, ha nem ismerjük az atomok eloszlását, nem tudjuk megmondani, hogy hány atomból származik a kibocsátott jel. Ez természetesen nem probléma akkor, amikor például tudjuk, hogy a felületen van egy atomi rétegnél kisebb mennyiségű szegregált atom, mert azok csak a felületen lehetnek, s akkor az atomok eloszlása meg van adva, s így meg tudjuk adni számukat. Ugyanígy nem volt probléma akkor sem, ha a „hagyományos" ionvékonyítást alkalmaztuk, mert az a kedvezőtlen bombázási körülmények miatt egy 2-8 nm vastag kevert réteget hoz létre, amelyben a koncentrációk kvázi állandók. Azzal, hogy az ionbombázás körülményeit úgy változtattuk meg, hogy a roncsolt réteg vastagsága már kisebb, mint az Auger-elektronok információs mélysége, sajnos vagy szerencsére az atomok eloszlását is figyelembe kell venni az AES spektrumok kiértékelésénél.

Az ionbombázással létrehozott felületi réteg analízise úgy végezhető el, hogy elsődleges becslést adunk az atomok eloszlására. Ennek lehetséges módja a következő (Menyhárd, 1998). Az ionbombázás által létrehozott változásokat elméleti úton leírjuk. Ennek módja, hogy az irodalomban ismert valamely elméletet alkalmazva, a kísérletnek megfelelően szimuláljuk az anyageltávolítás folyamatát. Feltételezünk egy kiinduló minta szerkezetet, a szimulációval leírjuk az ionbombázás hatását, és egy második szimulációval kiszámoljuk a várható Auger mélységi profilt. Ezt összehasonlítjuk a mérttel, és addig változtatjuk a kiindulási minta szerkezetet, amíg az egyezés kielégítő nem lesz. Erre a kiértékelésre azért van szükség, mert ahogy azt már említettük, a technológiailag és gyakorlatilag fontos mintákban a rétegvastagságok is és a roncsolt réteg vastagsága is a néhány nanométeres tartományban van. Egy ilyen vastagságú rétegben mindenképpen keletkeznek hibák az ionbombázás hatására, bármilyen alacsony bombázóenergiát alkalmazunk is.

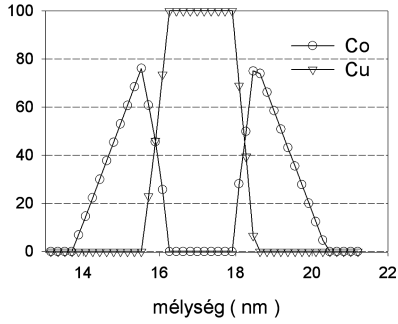
Illusztrációként egy tipikus vizsgálat eredményét mutatjuk, amely a szokásos ionbombázási módon nem végezhető el. A minta egy óriás mágneses ellenállású (spin valve, SV) réteg. Ezeket a rétegeket használják a merevlemezek olvasófejeiben, s valójában e rétegek nélkül lehetetlen a nagysűrűségű információk olvasása. Egy ilyen vékonyrétegszerkezet lelke három igen vékony réteg; két mágneses réteg (Co) van elválasztva egy nem mágneses (Cu) réteggel. Természete-

sen nem megyünk bele az óriás mágneses ellenállás magyarázatába, csak azt jegyezzük meg: bizonyos vastagságok szükségesek a fenti rétegeknél, hogy a rétegrendszernek tényleg nagyon nagy legyen a mágneses ellenállás változása akkor, ha a mágneses tér megváltozik. Egy működő rétegrendszer olyan például, hogy a két kobaltréteg vastagsága 1 nm, míg a rézréteg vastagsága 2,3 nm.

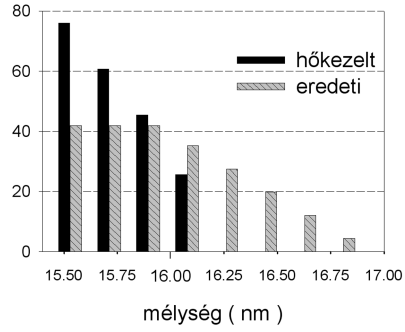
A rétegrendszer akkor lesz jó, ha a határfelületek élesek és atomosan simák, a kémiai koncentráció hirtelen változik meg. Ezeket a rétegeket természetesen mágneses mérésekkel jellemzik, és a mágneses ellenállás értéke a fontos paraméter. Ha elkészül egy minta, és a mágneses ellenállása nem megfelelő, nehéz megmondani, hogy mi a probléma. A jelen esetben az történt, hogy a gyártók (Kodak) próbálgatással rájöttek: a porlasztással létrehozott rétegrendszert hőkezelni kell ahhoz, hogy nagy értékű legyen a mágneses ellenállása. Kérdés, miért? Igen sok vizsgálat mellett szerkezetvizsgálatot is végeztünk. A keresztmetszeti TEM-szerkezetvizsgálatok ezeken a rétegrendszereken igen nehézkesek, hiszen a Co és Cu rendszáma igen közel van, s a relatív kontraszt nagyon kicsi. Ezeket a vizsgálatokat elvégeztük laboratóriumban, és csak annyit sikerült megállapítani, hogy a határfelületek nem túl durvák. Ugyanakkor a TEM-vizsgálat arra már nem alkalmas, hogy néhány atomi rétegen belüli keveredést kimutasson. Auger mélységi feltérképezéssel vizsgáltuk ezeket a mintákat. A hőkezelt minta esetében 700 eV ionbombázást alkalmazva a *3. ábrán* látható Auger mélységi profilt kaptuk (a profilnak csak a SV-re vonatkozó részét mutatjuk). Bár a mérési eredmény szépen mutatja, hogy rétegrendszer van, azt ebből nem tudjuk megállapítani, hogy a határfelületek élesek-e. Az Auger-elektronok szabadúthossza, amit az analízisben felhasználtunk, 1-1,5 nm, ami több mint a rétegvastagság, tehát nem is várhatunk éles profilt. Kiértékelési módszerünket alkalmazva a *4. ábrán* látható kezdőállapot esetében a *3. ábrán* mutatott szimulált profilt kapjuk, ami jól egyezik a mérttel. Ez azt jelenti, hogy a hőkezelés után a rétegrendszer valójában jó minőségű. Az *5. ábrán* összehasonlítjuk a minta szerkezetét (amit méréseinkből hatá-



3. ábra



4. ábra



5. ábra

roztunk meg) a hőkezelés előtti és utáni állapotban. Jól látszik, hogy a határrétegek kevertek voltak a készítés után, és a hőkezelés ezt a keveredést jelentősen csökkentette, ami a mágneses ellenállás növekedését eredményezte. Vegyük azt is észre, hogy az anyagátrendeződés a 0,3-0,5 nm tartományban történt, amit módszerünkkel ki tudtunk mutatni.

Kitekintés

A nanotechnológia és vékonyréteg-technológia fejlődésével úgy tűnik, hogy a két fent említett módszer egyre több alkalmazásba kapcsolódik be. További előnyt jelent, ha ezek a módszerek közvetlenül összekapcsolhatók más mérési eljárásokkal is. Ezek közül most a legfontosabbnak a különböző pásztázó mikroszkópos eljárásokat gondoljuk. Egész sor technikai problémát kell megoldani ahhoz, hogy egy ionbombázott mintán, vagy egy olyanon, amelyen Auger mélységi profilírozást végeztünk, például atomi erő mérést is tudjunk végezni. Ennek egy része, hogy rögzítenünk kell a vizsgálat helyét, a másik része, hogy ezt a vizsgálati helyet meg kell találnunk az atomi erő mikroszkópban is. Ennek a feladatnak a megoldására az intézet elnyert egy pályázatot (3/0064 sz. NKFP3), amelynek révén már tudtunk atomi erő mikroszkóp vizsgálatot végezni Auger mélységi profilírozással előállított határfelületen. Ennek igen szép eredménye (Barna et al., 2003), hogy megmutattuk, a bombázási sebességek különbözősége esetén reverzibilis határfelületi durvulás tapasztalható. Ez a példa azt mutatja, hogy egy komplex vizsgálathoz alapvetően szükséges különböző módszerek szimultán vagy egymás utáni alkalmazása.

Kulcsszavak: *TEM mintakészítés, Auger mélységi feltérképezés, ion-bombázás indukált roncsolódás*

IRODALOM

Barna Árpád (1992): Topographic Kinetics and Practice of Low Angle Ion Beam Thinning, in Proc.Fall Meeting MRS, 1991, in *Proc. Fall Meeting MRS, 1991, Boston, Workshop on Specimen Preparation for Transmission Electron Microscopy of Materials-III, MRS Conf. Ser.* Vol. 254. 3-22.

Barna Árpád – Radnóczi György – Pécz Béla (1997): in Amelinckx, Severin – van Dyck, D. – van Landuyt, J. – van Tendelo G. (eds.) in *Handbook of Microscopy*. VCH Verlag, Vol. 3, Chapter II/3, 751-801.

Barna Árpád – Menyhárd Miklós (1994): Auger depth profiling of deeply buried interfaces. Physica Status Solidi. (a) **145.** 263.

Barna Árpád – Pécz Béla – Menyhárd Miklós (1998): Amorphisation and Surface Morphology Development at Low Energy Ion Milling. Ultramicroscopy. **70,** 161-171.

Barna Árpád – Menyhárd M. – Zsolt G. – Zalar A. – Panjan, P. (2003): Interface Broadening Due to Ar^+ ion Bombardment Measured on Co/Cu Multilayer at Grazing Angle of Incidence. Journal of Vacuum Science and Technology. A 21. 553-557.

Menyhárd Miklós (1998): On the Performance of the TRIM Simulation for the Evaluation of Auger Depth Profiles. Surface and Interface Analysis. **26**. 1001-1007.

Zalar, Anton (1985): Improved Depth Resolution by Sample Rotation during Auger Electron Spectroscopy Depth Profiling. Thin Solid Films. **124**. 223-230

SZÉN NANOCSÖVEK ELÕÁLLÍTÁSA ÉS ALKALMAZÁSAI

Kónya Zoltán
PhD – konya@chem.u-szeged.hu
B. Nagy János
az MTA külső tagja – janos.bnagy@fundp.ac.be
Kiricsi Imre
a kémiai tudomány doktora – kiricsi@chem.u-szeged.hu
Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

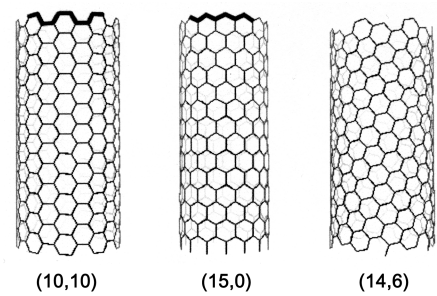
Bevezetés

A nanométer méretű részecskék világa rendkívül változatos. Az, hogy erről a világról nincs még kimerítő ismeretünk, annak tudható be, hogy csak a közelmúltban váltak szélesebb körben hozzáférhetővé azok az analitikai eszközök, amelyekkel ezt a világot vizsgálni lehet. Az eddig összegyűlt tapasztalatokból az a következtetés vonható le, hogy a nanoméretű anyagok másképpen viselkednek, mint a makroszkopikus világ szereplői. Itt most a nanométer méretű részecskék világának nagyon fontos képviselőiről, a szén nanocsövekről számolunk be, felvázolva lehetséges előállítási módszereiket, illetve néhány jellemző, a közeljövőben kihasználható tulajdonságukat.

A szén nanocsöveknek két alapvető csoportja van: egyfalú és többfalú nanocsövek. Előbbi esetben a nanocső egy tökéletes hengerré tekert, egyetlen atom vastagságú grafitréteg, míg az utóbbiak koncentrikusan egymásban elhelyezkedő egyfalú csövekből épülnek fel, úgy, hogy a hengerek egymástól 0,34 nm távolságban vannak. Az egymásba épülő csövek száma 2-től több tízig vagy akár 100-ig is változhat.

Az egyfalú szén nanocsövek a grafitsík feltekerésének miként jétől függően három csoportba sorolhatók: karosszék, cikkcakk és királis nanocsövek *(1. ábra)*. A feltekerés miként je befolyásolja az egyfalú nanocső elektromos tulajdonságait; minden karosszék konfigurációjú nanocső fémes viselkedésű, a cikkcakk nanocsövek közül azonban csak minden harmadik ilyen, a többiek félvezető tulajdonságokkal rendelkeznek. A királis nanocsövek esetén a kiralitás határozza meg a cső viselkedését.

Megjegyezzük, hogy a szén nanocsövek – sem az egyfalúak, sem a többfalúak – nem



1. ábra • Az egyfalú szén nanocsövek három jellegzetes családja: a „karosszék", a „cikkcakk", és az előbbiektől eltérő királis csövek

azonosak a szénszálakkal; ezek valóban csövek, azaz belsejükbe különböző anyagok tölthetők be (Monthioux, 2002).

A szén nanocsövek szintézisére számos módszer ismert. Beszámoltak már cseppfolyós nitrogénben, illetve argonban (Olk, 1998), cseppfolyós ammóniában (Matveev, 2001), vízben (Biró, 2003) és sóolvadékban (Biebuyck, 1997) végzett sikeres szintézisekről. Ismertek gázfázisú (Vander Wal, 2000) és szilárdfázisú (Lin, 2000) szintézismódszerek is. Ezek az eljárások nagy kapacitású nanocsőgyártó technológiákként még nem terjedtek el, holott például a vizes közegben grafitelektródok között végrehajtott elektromos kisülés (Matveev, 2001) vagy a ferrocén katalizálta lángpirolízis (Pana, 2002) technikailag nem állítana nagy nehézségeket a méretnövelés elé.

Jelenleg két módszer látszik alkalmasnak nagy mennyiségű – itt természetesen nem tonnákról, hanem kilogrammokról beszélünk – szén nanocsövek előállítására. Az egyik a plazmatechnológia (Fulcheri, 2002), amely elektromos ívkisülés révén hoz létre a nanocső képződéséhez megfelelően magas, úgynevezett plazmahőmérsékletet. Itt szénatomok, illetve atomcsoportok képződnek a szén elektródokból, és rakódnak le különböző szénformákként a reaktorban. A másik módszer a szénhidrogének gázfázisú katalitikus bontása (CCVD – Catalytic Chemical Vapor Deposition) (Yacamán, 1993; Ivanov, 1994). Ez utóbbi módszer fejlesztésében vett részt laboratóriumunk. Tanulmányoztuk a katalitikus fémkomponens hatását (Fonseca, 1998; Hernádi, 1996), a reaktáns (Hernádi, 2000) és a katalizátor hordozó szerepét (Hernádi, 2003). Megvizsgáltuk azt is néhány példán, hogy kétfémes katalizátorok esetén mire vezethető vissza a megnövekedett aktivitás (Mukhopadhyay, 1999; Willems, 2000; Kónya, 2001).

A szén nanocsövek szintézise során a csöveken kívül más szénformák is képződnek, sőt olykor ezek alkotják a termék döntő hányadát. A szintézist követő tisztítás folyamán eltávolítjuk az amorf szénféleségeket, a grafitos jellegű szénformákat, s közben a kezelések hatására felnyílnak a nanocsövek végei, amelyek egyébként a legtöbb esetben zártak (Ebbesen, 1994). A tisztítás eredményeként kapott tiszta, nyitott nanocsövek már nagy fajlagos felülettel rendelkeznek. Sok esetben azonban nem sikerül a tökéletes tisztítás, és a mintában katalizátornyomok és más szénformák is maradnak. Ennek furcsa következménye, hogy a minta fajlagos felülete vagy valamilyen gázra vonatkoztatott adszorpciós kapacitása nem éri el a kívánt értéket.

A szén nanocsöveken végzett kémiai átalakítások közül a szén nanocső elágazások kémiai úton történő készítése az egyik legérdekesebb feladat. Kimutatták, hogy a tisztítás során a felnyitott nanocsővégeken oxigéntartalmú funkciós csoportok jönnek létre (Zhang, 2000). Ezeknek a legtöbbször karboxil és hidroxil csoportoknak az átalakíthatóságáról szintén ismertek eredmények (Hamon, 1999). Ha a nanocsövek külső palástján létrehozhatók funkciós csoportok, akkor lehetőség nyílik, legalábbis elvben, hogy a nanocsövekkel kémiai reakciót lehessen végrehajtani. Ezeknek eredményeként funkciós csoportokkal ellátott csővégek és palástok esetén különböző geometriájú elágazásokat lehet előállítani. T, Y, X formájú elágazásokra a nanoelektronika fejlődésével egyre növekvő igény lesz. Mivel a szén nanocsövek közül a többfalú csövek előállítása és funkcionalizálása is egyszerűbb, ezen az úton indultunk el a nanocső-elágazások kémiai reakciókkal való előállítása területén. Ezeket az eredményeinket is összefoglaljuk a következőkben.

Kísérletek

A kísérletekben használt többfalú szén nanocsöveket acetilén katalitikus bontásával állítottuk elő. A módszer részletes leírása megtalálható egy előző közleményünkben (Kónya,

2002). Amikor az egy- és kétfémes katalizátorokat hasonlítottuk össze, akkor a minták összes fémtartalma minden esetben 5 t% volt. A Fe és Co, valamint a Ni és V párok esetén a katalizátor prekurzort, azaz a fémsókat egymás után pároltuk rá a hordozókra, ami előbbi esetben alumíniumoxid, utóbbiban pedig templátmentesített ZSM-5 zeolit volt.

Az *in situ* XPS mérésekhez a katalizátort a berendezés mintaelőkészítő kamrájában levegő és nedvesség kizárása mellett készítettük el. A katalizátorokon a szén nanocső növesztését is magában a berendezésben *in situ* körülmények mellett hajtottuk végre. Lényeges volt, hogy a minta a kísérlet teljes tartama alatt nem kerülhetett érintkezésbe levegővel vagy nedvességgel.

A Mössbauer-mérésekhez egy speciális mintakészítési technológiát alkalmaztunk (Kónya, 2003). Ennek a látszólagos *in situ* mintakészítésnek és mérésnek a lényege a következő volt: a megfelelően előkezelt katalizátorokon a nanocsöveket a szokásos módon készítettük, a megfelelő reakcióidő és az acetilénáramlás lezárása után a reaktort tiszta nitrogénáramban hűtöttük le, és a nanocsöveket tartalmazó katalizátort levegő kizárása mellett dry-boxba tettük, ahol megfelelő méretű (2 cm átmérőjű) pasztillát készítettünk belőle paraffinban való beágyazással. Ez a minta-geometria megfelelt a Mössbauer-méréseknek, és készítés során gyakorlatilag nem érintkezett levegővel vagy nedvességgel.

A szén nanocső elágazások készítéséhez a nanocsöveket funkcionalizáltuk. Az egy- és a többfalú nanocsövek funkcionalizálásának néhány lehetősége és a receptúrák megtalálhatók néhány korábbi közleményünkben (Hamon, 1999; Niesz, 2002). A megfelelő tisztítási eljárásnak alávetett többfalú szén nanocsövek a csővégeken és a külső héjak hibahelyein legtöbbször karboxil és hidroxil csoportokat tartalmaznak. Ezeket a csoportokat vízmentes körülmények között $SOCl_2$-vel reagáltatva –COCl csoportokká lehet alakítani, amely csoportok azonban nagyon reaktívak, és könnyen reagálnak például aminokkal. A reakcióban HCl-eltávozás mellett amidkötés jön létre. Ezzel a reakcióval tehát a nanocsövekhez lehet kapcsolni minden olyan reaktánst, amely a megfelelő funkciós csoportokkal rendelkezik. Ilyenek lehetnek az aminosavak, a nukleotidok, stb. Két nanocső összekapcsolódhat a csővégeken lévő funkciós csoportokon keresztül, illetve, mivel a nanocsövek palástján is vannak funkciós csoportok, kialakulhatnak akár T vagy Y alakú elágazások is. Kísérleteinkben vizsgáltuk a két és három aminfunkcióval rendelkező kapcsoló ágensekkel történő módosítási lehetőségeket is.

Gázadszorpciós méréseink témája a metán, a hidrogén és a CO adszorpció tanulmányozása volt. Ezekhez a kísérletekhez nagytisztaságú nanocsöveket használtunk.

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

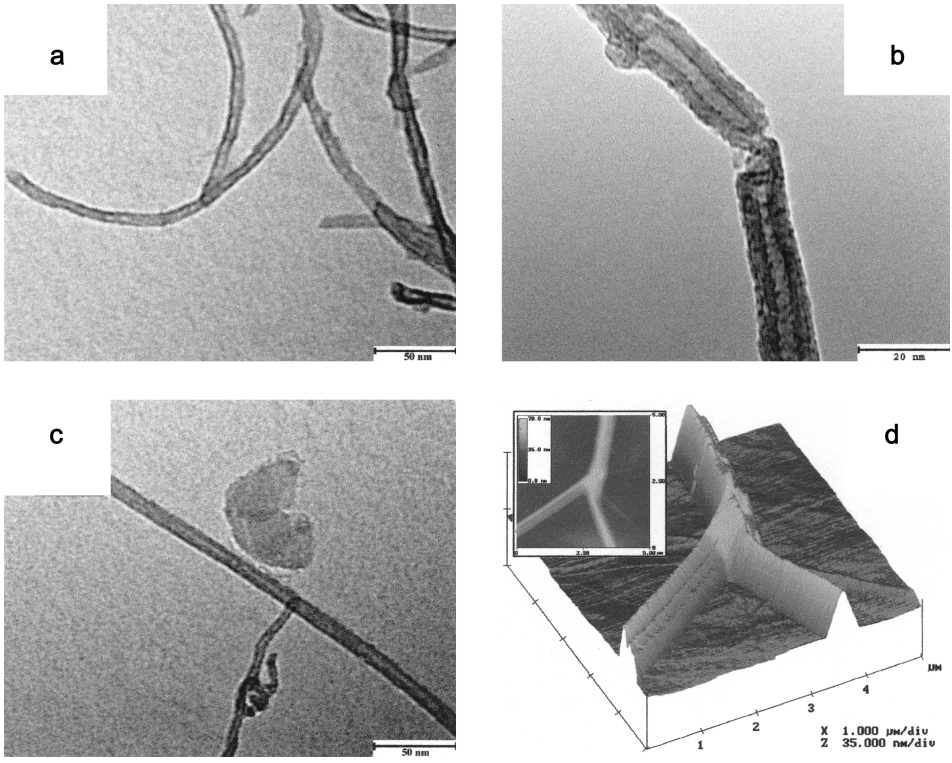
A kétfémes katalizátorok

Az irodalom és saját tapasztalatunk is azt mutatta, hogy a Co-Fe kétfémes szol-gél módszerrel készített katalizátor nagyobb hozammal ad többfalú szén nanocsövet acetilénből 700 °C-on, mint egyedül a vas- vagy a kobalt-katalizátor (Kukovecz, 2000). Feltételeztük, hogy a két fémből a reakciókörülmények között ötvözetfázis alakul ki, a megnövekedett aktivitás ennek tulajdonítható. Hogy eldönthessük, képződik-e Co-Fe ötvözet a katalizátoron, *in situ* XPS és Mössbauer- méréseket végeztünk. A vas és a kobalt fázisdiagramja szerint 700 °C környékén elegyfázis képződik 0,5 atomtört környezetében. Mössbauer- és XPS vizsgálataink arra utaltak, hogy valóban ötvözetfázis alakul ki, s ez felelős a megnövekedett katalitikus hatásért.

Az előzővel csaknem egyező katalitikus bontási tapasztalatot szereztünk a Ni-V rendszerrel. Ez a rendszer leginkább abban külön-

bözik a Co-Fe rendszertől, hogy míg a Co-Fe rendszer esetén a két komponens különkülön is alkalmas nanocsövek szintézisére, a Ni-V rendszer esetén a V magában nem alkalmas nanocsövek előállítására. Amikor a két komponens együttesen volt a ZSM-5 zeolit hordozón, kiemelkedő nanocső-hozamot tapasztaltunk. A fázisdiagramok tanulmányozása arra utalt, hogy ebben az esetben valószínűtlen az ötvözetképződés a szén nanocső előállítás hőmérséklete környezetében. Megvizsgáltuk a CCVD nanocsőnövesztést *in situ* XPS módszerrel. A mérések arra az eredményre vezettek, hogy nem képződik elegyfázis, nincs ötvözet, a V oxidációs állapotában, illetve koordinációjában viszont jelentős változás áll be. A vanádium egy része beépül a zeolit szerkezetébe, ami nem idegen a zeolitkémikusok számára. Számos esetben, több fémnél leírták a fémszerkezetbe, azaz a zeolitrácsba való beépülését (Petras, 1992). A vanádium beépülésével lényegesen megváltozik a katalitikusan aktív fázis összetétele, de nem az ötvözetképződés a változás lényege.

A Co-Fe és a V-Ni katalizátorokra vonatkozó eredmények alapján tehát nem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy az ötvözetfázis kialakulása felelős a nagy katalitikus aktivitásért. Annyit lehet biztonsággal mondani az eddig tanulmányozott kétfémes rendszerekről, hogy a két fém együttes jelenléte következtében lényeges, a fémek koordinációját és kémiai környezetét befolyásoló változások mennek végbe, amelyek között ötvözetképződés vagy az egyik fémnek az oxidfázisba való beépülése egyaránt megtörténhet.



2. ábra • TEM (a, b és c) és AFM (d) felvételek szén nanocső elágazásokról

Reakciók nanocsövekkel

Ezekben a kísérletekben kémiai reakciókkal kapcsoltunk össze szén nanocsöveket. A –COCl funkciós csoportokkal ellátott többfalú szén nanocsövek összekapcsolását propándiaminnal, tirozinnal és oligonukleotidokkal mint kapcsoló ágensekkel kíséreltük meg. Azt vártuk, hogy a reakciótermékben kettős és hármas elágazásokat találunk. A *2. ábrán* mutatunk be néhány felvételt az elágazásokról.

A felvételek azt igazolják, hogy lehetőség van szén nanocsövek összekapcsolására kémiai reakcióval. A képek nem mutathatják, legalábbis az alkalmazott felbontásban, hogy milyen, illetve mekkora a kapcsoló molekula. Másképpen fogalmazva, nem tudjuk a TEM (transzmissziós elektronmikroszkóp) képek alapján a nanocsövek közti távolságot megbecsülni. A többfalú szén nanocsövek mérete jóval meghaladja a kapcsoló molekula méretét. Ebből következik, hogy detektálásuk a nanocsövek között meglehetősen összetett feladat lesz. Tovább nehezíti a kérdés megválaszolását TEM módszer esetén, hogy egy elágazásban feltehetőleg nem csak egy kapcsoló molekula vesz részt. A felnyitott csővégeken nagyon sok funkciós csoport található, ezek mindegyike képes elvileg reakcióba lépni egy-egy kapcsoló molekulával. Az így kialakult kapcsoló molekula csoport ismét reagálhat funkcionalizált nanocsövekkel. Ennek eredménye egy sokszoros kötésekkel megerősített kapcsolás lehet. További vizsgálatok vannak folyamatban a kapcsolatokban részt vevő molekulák szerepének tisztázására. Ez azért is fontos, mert a nanocsőből készített elágazások nanoelektronikai alkalmazásánál előnyös és bizonyos esetekben szükséges, hogy az elágazó ágat egy dielektrikum válassza el a másik csőtől (tranzisztor-effektus).

Elvégeztük az Y elágazás esetében az AFM (atomi erő mikroszkóp) vizsgálatokat *(2/d ábra),* amelyek igazolták, hogy várakozásunknak megfelelően kémiai kötés köti össze a nanocsöveket, az elágazások ugyanis nem voltak deformálhatók AFM tűvel való mechanikai taszítás hatására.

A kémiai módszerrel történő szén nanocső-elágazások készítése azért előnyös, mert ismert kémiai reakciókon keresztül valósul meg, tehát bizonyos értelemben tervezhető, azaz az elágazások koncentrációja a termékben követi a kémiai reakciók szabályait, így a kiindulási anyagok koncentrációjával befolyásolható. A problémák a módszerrel a következők. Nem ismert még olyan módszer, amellyel az elágazásokat a nemreagált reakciópartnerektől (kapcsoló molekula és kiindulási nanocső) el lehet választani, illetve az sem ismert, hogyan lehetne a különböző elágazásokat egymástól elválasztani. Mivel a tervezhető elágazások létrehozása igen ígéretes lehetőség szén nanocső alapú mikrochipek kifejlesztésére, számos kutatóhelyen foglalkoznak ezekkel a problémákkal.

Gáztárolás szén nanocsövekkel

Az éghető gázok biztonságos tárolása régóta központi problémája az energiaiparnak és a vele kapcsolatos szolgáltató- és ellátószervezeteknek. Különösen felélénkült az érdeklődés azután, hogy lehetőség mutatkozott olcsó hidrogén előállítására napenergia felhasználásával vagy biotechnológiai módszerrel. Így ugyanis elérhető közelségbe került a hidrogén használata belsőégésű motorokban, aminek az előnyét környezeti szempontból nem lehet elég magasra értékelni.

A hidrogén tárolása lehetséges kémiai úton fémhidridekben vagy adszorpciós úton valamilyen megfelelő adszorbensben. A vegyületkénti tárolás gondja a reverzibilitással van. A fémhidridek jelentős mennyiségű hidrogént tartalmaznak, s azt le is adják, miközben elbomlanak. A képződő oxid/hidroxid visszaalakítása hidriddé azonban még nem megoldott.

Bizonyos nemesfémek, például a Pd meglehetősen jól oldják a hidrogént, elvileg bennük hidrogén tárolható. Áruk mellett a jelentős szállítandó tömeg is az egyik akadálya alkalmazásuknak.

Ismert, hogy a grafit képes rétegei közé hidrogént interkalálni. Az anyag eredetétől függően ez a mennyiség 4–5 t% között változik szobahőmérsékletű adszorpciókor 112 bar nyomás mellett (Fonseca, 2002; Poirier, 2001). Ha a grafitot alkálifémmel módosítják, a hidrogénfelvevő képessége is növekszik; K-mal módosított grafit esetén a hidrogénfelvevő kapacitás 5 t% 313 K-nél magasabb hőmérsékleten és atmoszféra nyomáson, míg Li-mal módosított grafitnál már 14 t% 473-673 K között 1 bar nyomáson (Poirier, 2001). Szénszálak hidrogéntároló képességét is vizsgálták. Azt találták, hogy összehasonlítható kísérleti körülmények között a szén nanoszálak hidrogénfelvétele azok felépítésétől függ: halszálka > lemezes > csöves sorrendben csökken, 67,5, 53,7, valamint 11,3 % (Fonseca, 2002; Poirier, 2001). Ezen eredmények mellett más adatok is megjelentek a szakirodalomban. Grafitos szénszálakon 300 K-en 157,9 bar nyomáson 0,24 t%, 4,44 bar nyomáson 77 K-en 0,16 t% hidrogénfelvételt mértek (Ahn, 1998). Meglepő ugyanakkor, hogy mások szerint 298 K-en 112 bar nyomáson akár 67 t% hidrogénfelvétel is elérhető (Chambers, 1998). Ezek az adatok meglehetősen bizonytalanná teszik a hidrogéntárolás problémáját még ezeken a nanocsöveknél egyszerűbb szerkezetű anyagokon is.

Az egyfalú szén nanocsövek hidrogénfelvevő kapacitására vonatkozó eredmények sem mentesek az ellentmondásoktól. Reális adatnak tekinthető a 3,3 t%, amelyet 77 K-en és közel 9 bar nyomás mellett mértek (Fonseca, 2002). Többfalú nanocsöveknél a helyzet rosszabb. Itt a kapacitás nem éri el az egyfalúaknál mért értékeket (Roth, 2001; Wu, 2000; Cao, 2001; Zhu, 2001).

Ezek az adatok arra engednek következtetni, hogy már magánál a mérésnél is lehetnek problémák. Mik lehetnek ezek? A kísérletek leírásában csak ritkán olvasható a hidrogén tisztításának módja, pedig ha abban bármely szennyeződés előfordult – a leggyakoribb a víz jelenléte –, akkor az jelentősen befolyásolhatja a mérés eredményét. Nedves hidrogénnel végezve a méréseket tízszer nagyobb kapacitások is mérhetők (Fonseca, 2002, Yang, 2000). Ha a nanocső nem teljesen tiszta, alacsonyabb kapacitásokat határoztak meg (Fonseca, 2002; Roth, 2001; Dillon, 1999). Ennek az oka például a katalitikus módszerrel készített nanocsövek esetén a katalizátorszemcsék vagy azok maradékai a nanocső mintában.

Ha feltesszük, hogy tiszta anyagokkal dolgozunk, akkor lehetőség látszik a hidrogén tárolásának megvalósítására egyfalú nanocsövekkel. Arra a kérdésre azonban, hogy az így tárolt hidrogén felhasználható lesz-e gépjárművekben, egyelőre lehetetlen válaszolni. A problémát az okozza, hogy a gépjármű működtetéséhez a hidrogént folyamatosan kell visszanyerni, azaz tankoláskor nem célszerű 77 K-re lehűteni a tankot a megfelelő kapacitás eléréséhez, mert azt fel is kell majd melegíteni a folyamatos hajtóanyagellátáskor.

A bemutatott adatok világosan mutatják, hogy a hidrogéntárolás problémája egyfalú szén nanocsövekben még megoldatlan. A gyakorlati alkalmazást, azaz a hidrogénnel hajtott gépjárművek üzemanyagtartályának megtöltését egyfalú szén nanocsővel az is nehezíti, hogy a megfelelően tiszta egyfalú nanocső ára vetekszik a gyémántéval.

Mindazonáltal el kell mondani azt is a teljesség igénye miatt, hogy a tudományterületen az utóbbi időben megjelenő dolgozatok egyre inkább afelé mutatnak: a nanocsövekben tárolható hidrogén mennyisége nem éri el azt a határt, ami a hidrogéntárolók tényleges technológiai megvalósításához szükséges.

Összefoglalás

A dolgozatban a szén nanocsövek szintézisével és alkalmazásával foglalkoztunk. A szintézis problémaköréből a kétfémes katalizátorok szerepét, azon belül a fémek állapotára vonatkozó vizsgálatainkat ismertettük. A felhasználás területén a kémiai reakciókkal gyártott szén nanocső elágazásokra vonatkozó eredményeinkből mutattunk be példákat, és röviden érintettük a szén nanocsőben való gáztárolás kérdését is.

Köszönetünket fejezzük ki Kis Jánosnak és Oszkó Albertnek az XPS mérésekhez, Lázár Károlynak a Mössbauer-mérésekhez és Biró László Péternek az STM és AFM mérésekhez nyújtott segítségéhez, valamint az alábbi pályázatok anyagi támogatását: OTKA T037952 és F038249, Bolyai János posztdoktori ösztöndíj.

Kulcsszavak: *egyfalú és többfalú nanocsövek, nanocsövek funkcionalizálása, T, Y, X formájú elágazások, reakciók nanocsövekkel, hidrogénfelvevõ kapacitás*

IRODALOM

Ahn, Channing C. – Ye, Y. – Ratnakumar, B. – Witham, C. – Boroman Jr., R. C. – Fultz, B. (1998): Hydrogen Desorption and Adsorption Measurements on Graphite Nanofibers. Applied Physics Letters. 73, **23**, 3378-3380.

Biebuyck, Hans A. – Larsen, N. B. – Delamarche, E. – Mitchel, B. (1997): Lithography Beyond Light: Microcontact Printing with Monolayer Resists. IBM Journal of Research and Development. 41, **1-2**, 159-170.

Biró László Péter – Horváth Z. E. – Szalmás L. – Kertész K. – Wéber F. – Juhász G. – Radnóczi G. – Gyulai J. (2003): Continuous Carbon Nanotube Production in Underwater AC Electric Arc. Chemical Physics Letters. 372, **3-4**, 399-402.

Cao, Anyuan – Zhu, H. – Zhang, X. – Li, X. – Ruan, D. – Xu, C. – Wei, B. – Liang, J. – Wu, D. (2001): Hydrogen Storage of Dense-Aligned Carbon Nanotubes. Chemical Physics Letters. 342**, 5-6,** 510-514.

Chambers, A. – Park, C. – Baker, R. T. K. – Rodriguez, N. M. (1998): Hydrogen Storage in Graphite Nanofibers. Journal of Physical Chemistry B. 102, 4253.

Dillon, Anne C. – Gennett, T. – Alleman, J. Z. L. – Jones, K. M. – Parilla, P. A. – Heben, M. J. (1999): *Carbon Nanotube Materials For Hydrogen Storage*. Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review.

Ebbesen, Thomas W. – Ajayan, P. M. – Hiura, H. – Tanigaki, K. (1994): Purification of Nanotubes. Nature. 367**, 6463**, 519.

Fonseca, Antonio – Hernadi, K. – Piedigrosso, P. – Colomer, J. F. – Mukhopadhyay, K. – Doome, R. – Lazarescu, S. – Biro, L. P. – Lambin, Ph. – Thiry, P. A. – Bernaerts, D. – B. Nagy, J. (1998): Synthesis of Single- and Multi-Wall Carbon Nanotubes Over Supported Catalysts. Applied Physics A. 67**, 1**, 11-22.

Fonseca, Antonio – Pierard, N. – Tollis, S. – Bister, G. – Kónya, Z. – Nagaraju, N. – B. Nagy, J. (2002): Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes Produced by CVD. Journal de Physique IV. (France): 12**, PR4**, 129-137.

Fulcheri, Laurent – Probst, N. – Flamant, G. – Fabry F. – Grivei E. – Bourrat, X. (2002): Plasma Processing: A Step Towards the Production of New Grades of Carbon Black. Carbon. 40**, 2**, 169-176.

Hamon, Mark A. – Chen, J. – Hui, H. – Chen, Y. – Itkis, M. E. – Rao, A. M. – Eklund, P. C. – Haddon, R. C. (1999): Dissolution of Single-Walled Carbon Nanotubes. Advanced Materials. 11, **10**, 834-840

Hernádi Klára – Fonseca, A. – B. Nagy J. – Bernaerts, D. – Lucas, A. A. (1996): Fe-Catalyzed Carbon Nanotube Formation. Carbon 34, **10**, 1249-1257.

Hernádi Klára – Fonseca, A. – B. Nagy J. – Siska A. – Kiricsi I. (2000): Production of Nanotubes by the Catalytic Decomposition of Different Carbon-Containing Compounds. Applied Catalysis A. 199, **2**, 245-255.

Hernádi Klára – Kónya Z. – Siska A. – Kiss J. – Oszkó A. – B. Nagy J. – Kiricsi I. (2003): On the Role of Catalyst, Catalyst Support and Their Interaction in Synthesis of Carbon Nanotubes by CCVD. Materials Chemistry and Physics. 77**, 2**, 536-541.

Hidber, Pirmin C. – Helbig, W. – Kim, E. – Whitesides, G. M. (1996): Microcontact Printing of Palladium Colloids: Micron-Scale Patterning by Electroless Deposition of Copper. Langmuir. 12, **5**, 1375-1380.

Ivanov, V. – B. Nagy J. – Lambin, Ph. – Lucas, A. A. – Zhang, X. B. – Zhang, X. F. –Bernaerts, D. – Van Tendeloo, G. – Amelinckx, S. – Van Landuyt, J. (1994): The Study of Carbon Nanotubules Produced by Catalytic Method. Chemical Physics Letters. 223, **4**, 329-335.

Kónya Zoltán – Kiss J. – Oszkó A. – Siska A. – Kiricsi I. (2001): XPS Characterisation of Catalysts During

Production of Multiwalled Carbon Nanotubes. Physical Chemistry Chemical Physics. 3, **1**, 155-158.

Kónya Zoltán – Vesselényi I. – Lázár K. – Kiss J. – Kiricsi I. (2003): Comparison of Fe/Al_2O_3 and $Fe,Co/Al_2O_3$ Catalysts Used For Production of Carbon Nanotubes From Acetylene by CCVD. Proceedings of SPIE – the International Society For Optical Engineering. **5118**, 296-304.

Kónya Zoltán – Vesselényi I. – Niesz K. – Kukovecz A. – Demortier, A. – Fonseca, A. – Delhalle, J. – Mekhalif, Z. – B. Nagy J. – Koós A. A. – Osváth Z. – Kocsonya A. – Biró L. P. – Kiricsi I. (2002): Large Scale Production of Short Functionalized Carbon Nanotubes. Chemical Physics Letters. 360, **5-6**, 429-435.

Kukovecz Ákos – Kónya Z. – Nagaraju, N. – Willems, I. – Tamási A. – Fonseca, A. – B. Nagy J. – Kiricsi I. (2000): Catalytic Synthesis of Carbon Nanotubes Over Co, Fe and Ni Containing Conventional and Sol-Gel Silica-Aluminas. Physical Chemistry Chemical Physics. 2, **13**, 3071-3076.

Lin, L. J. J.– Zeng, H. C. (2000): Formation Route of Carbon Nanotubes in a Gel Matrix. Chemistry of Materials. 12, **11**, 3466-3471.

Matveev, Andrei T.– Golberg, D.– Novikov, U. P.– Klimkovich, L. L.– Bando Y. (2001): Synthesis of Carbon Nanotubes Below Room Temperature. Carbon. 39, **1**, 155-158.

Monthioux, Mark (2002): Filling Single-Wall Carbon Nanotubes. Carbon. 40, **10**, 1809-1823.

Mukhopadhyay, Kingsuk – Koshio, A. – Sugai, T. – Tanaka, N. – Shinohara, H. – Kónya Z. – B. Nagy J. (1999): Bulk Production of Quasi-Aligned Carbon Nanotube Bundles by the Catalytic Chemical Vapour Deposition (CCVD) Method. Chemical Physics Letters. 303, **1-2**, 117-124.

Niesz, Krisztián – Siska A. – Vesselényi I. – Hernádi K. – Méhn D. – Galbács G. – Kónya Z. – Kiricsi I. (2002): Mechanical and Chemical Breaking of Multiwalled Carbon Nanotubes. Catalysis Today. 76, **1** 3-10.

Olk, Charles Howard (1998): *US Patent 5,753,088*, (General Motors).

Pana, O. – Darabont, A. – Chicinas, I. – Neamtu, C. – Silipas, T. D. – Indrea, E. (2002): Nanostructured $La_{0.67}Ca_{0.33}mno_3$: Synthesis and Structural Characterisation. Acta Tehnica Napocensis. **45**, 227-231.

Petras, M. – Wichterlova, Blanka (1992): High–Temperature Interaction of Vanadium Pentoxide with H–ZSM–5 Zeolite – ESR and IR Study. Journal of Physical Chemistry. 96, **4**, 1805-1809.

Poirier, Éric – Chahine, Richard – Bose, Tapan K. (2001): Hydrogen Adsorption in Carbon Nanostructures. International Journal of Hydrogen Energy. 26, **8**, 831-835.

Roth, Siegmar (2001): *Communication APP1-3 in XVth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials*, Kirchberg, 3-10 March 2001.

Vander Wal, Randy L. (2000): Flame Synthesis of Substrate-Supported Metal-Catalyzed Carbon Nanotubes. Chemical Physics Letters. 324, **1-3**, 217-223.

Willems, Isabelle – Kónya, Z. – Colomer, J. F. – Van Tendeloo, G. – Nagaraju, N. – Fonseca, A. – B.Nagy, J. (2000): Control of the Outer Diameter of Thin Carbon Nanotubes Synthesized by Catalytic Decomposition of Hydrocarbons. Chemical Physics Letters. 317, **1-2**, 71-76.

Wu, X. B. – Chen, P. – Lin, J. – Tan, K. L. (2000): Hydrogen Uptake by Carbon Nanotubes. International Journal of Hydrogen Energy. **25, 3,** 261-265.

Yacamán, Miguel José –Yoshida, Miki M. – Rendón, L. – Santiesteban, J. G. (1993): Catalytic Growth of Carbon Microtubules with Fullerene Structure. Applied Physics Letters. 62, **6**, 657-659.

Yang, Ralph T. (2000): Hydrogen Storage by Alkali-Doped Carbon Nanotubes-Revisited. Carbon. 38, **4**, 623-626.

Zhang, Yaogang – Shi, Z. – Gu, Z. – Iijima S. (2000): Structure Modification of Single-Wall Carbon Nanotubes. Carbon. 38**, 15**, 2055-2059.

Zhu, H. – Cao, A. – Li, X. – Xu, C. – Mao, Z. – Luan, D. – Liang, J. – Wu, D. (2001): Hydrogen Adsorption in Bundles of Well-Aligned Carbon Nanotubes At Room Temperature. Applied Surface Science. **178,** 50.

ÚJSZERÛ SZÉN NANOCSÕ ARCHITEKTÚRÁK

Biró László Péter

PhD, MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet
Nanoszerkezetek Kutatása Osztály – biro@mfa.kfki.hu
http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/

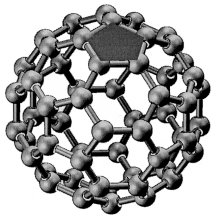
Az egyenes szén nanocsövek, 1991-es felfedezésük óta (Iijima, 1991) a figyelem középpontjában állnak kivételes mechanikai (Treacy, 1996) és elektromos tulajdonságaiknak (Saito, 1992; Mintmire, 1992) köszönhetően. A szén nanocsövekre irányuló kitüntető figyelmet az is indokolja, hogy kiváló modellanyagként szolgálnak az egydimenziós rendszerek kísérleti és elméleti tanulmányozására, és számos ígéretes alkalmazással kecsegtetnek (Dresselhaus, 1996; Biró, 2001; Dresselhaus, 2001; Kónya, 2001).

A szén sokarcú elem, akár a fizika, akár a kémia felől szemlélve. Klasszikus allotrópjai: a gyémánt és a grafit a keménységskála ellenpólusain helyezkednek el, és elektromos tulajdonságaik szempontjából is jelentősen eltérnek: a gyémánt széles tiltott sávú félvezető (sávszélessége 5,5 eV), a grafit viszont nulla szélességű tiltott sávval rendelkező félfém. A hétköznapi tapasztalatok szintjén maradva: grafitceruzával írunk a papírra és gyémánttal a legkeményebb anyagokat is megkarcolhatjuk.

Az ellentétes tulajdonságok a szén négy vegyértékelektronjának eltérő hibridizációjából erednek. A szénatom elektronkonfigurációja $1s^2 2s^2 p_x^1 p_y^1$, mivel a molekulák kémiai kötéseinek létrehozásában csak a vegyértékelektronok vesznek részt, elég, ha a további tárgyaláshoz csak ezeket, azaz a szénatom esetén a $2s^2 p_x^1 p_y^1$ elektronokat vesszük figyelembe. Az sp^3 hibridizáció során a szén $2s^1 p_x^1 p_y^1 p_z^1$ pályáiból négy, egyenértékű sp^3 hibridpálya jön létre, úgy, hogy a szénatom egy szabályos tetraéder középpontjában helyezkedik el, és a kötések a tetraéder csúcsai felé mutatnak (gyémánt). Az sp^2 hibridizáció során csak három elektron vesz részt a kötések kialakulásában, ezek három, ugyanabban a síkban, egymástól 120°-ra elhelyezkedő kötést eredményeznek, míg a negyedik elektron a síkra merőleges (p_z) pályán helyezkedik el (grafit). A három, egymással 120° szöget bezáró kötés eredményezi a grafit, hatszöges rétegekből felépülő, „méhsejtszerű" atomi elrendeződését. A gyémántra jellemző sp^3 hibridizáció makroszkopikus szempontból a legnagyobb keménységgel járó atomi elrendeződést eredményezi, míg a grafitra jellemző sp^2 hibridizációhoz szinte a legkisebb makroszkopikus keménység társul, mert a grafit hatszöges atomi elrendeződést mutató rétegei egymástól távol helyezkednek el (0,335 nm-re), és köztük csak gyenge, van der Waals-kötések hatnak. Érdemes azonban megjegyezni, hogy a hatszöges síkokban a szénatomokat elválasztó távolság (0,142 nm) kisebb, mint a gyémánt esetében mérhető atom-atom távolság (0,154 nm). Azaz a hatszögek síkjában egyetlen atom vastagságú grafit (grafén) mechanikai tulajdonságai felülmúlnák egyetlen atom vastag gyémántréteg tulajdonságait. Ez a kísérlet nyilván csak a gondolatkísérletek világában lehetséges,

ellentétben a grafittal, amely réteges szerkezetű anyag, a gyémántra jellemző köbös szerkezete nem teszi lehetővé az egy atom vastagságú, folytonos réteg kimetszését. A fent említetteknek tulajdonítható, hogy valamennyi ma ismert anyag közül az egyfalú szén nanocsövek rendelkeznek a legnagyobb szilárdsággal.

Mai ismereteink szintjén megalapozottan állítható, hogy a szén-szén kötések átrendezésével új, meglepő tulajdonságú anyagok nyerhetők. A fullerén felfedezőinek, Harold Kroto-nak és munkatársainak (Kroto, 1985) azonban nem mindennapi szellemi bravúrra volt szükségük annak felismeréséhez, hogy a tömegspektrométeres méréseik során, a hatvan szénatomnak megfelelő tömegnél makacsul jelentkező csúcs azt jelenti: létezik egy hatvan atomból felépülő, tökéletesen gömb alakú, 1 nm átmérőjű molekula, a C_{60} (Braun, 1996) ***(1. ábra).*** Ez a történelmi felismerés olyan kutatásokat indított el, amelyek rövid idő alatt világszerte sok ezer kutatót foglalkoztató új tudományterületet hoztak létre a fizika, a kémia és az anyagtudományok mezsgyéjén: a szén nanoszerkezetek kutatását. A területen belül az egyik leggyorsabban fejlődő irány a szén nanocsövekre koncentrál (Baughman, 2002). Ez a fokozott érdeklődés az egyenes szén nanocsövek ígéretes elektromos és mechanikai tulajdonságainak következménye (Biró, 2001; Dresselhaus, 2001; Kónya, 2001).



1. ábra • A C_{60} molekula szerkezete; az egyik ötszöget sötét kitöltéssel emeltük ki.

Az egyenes, egyfalú szén nanocső egy olyan nano-objektum, amelyet úgy képzelhetünk el, mint az egyetlen atom vastagságú grafitréteg (grafén) tökéletes hengerré tekerése nyomán nyert alakzatot. A többfalú szén nanocső több, koncentrikusan egymásba helyezett, egyfalú csőből épül fel, úgy, hogy az egyes falak közötti távolság megegyezik a turbóréteges grafitra jellemző, 0,34 nm értékkel. Az egyfalú, egyenes szén nanocső elektromos tulajdonságait az a mód határozza meg, ahogyan a grafén réteg feltekerésére sor kerül, ez egyértelműen megadható az ún. feltekerési vektor segítségével (Dresselhaus, 1996; Biró, 2001; Kónya, 2001). A vektor origójában és végpontjában található szénatomok „egybeolvasztásával" keletkező hengerfelületen a feltekerési vektor a cső tengelyére merőleges kört alkot. A $\boldsymbol{C} = n\,\boldsymbol{a}_1 + m\,\boldsymbol{a}_2$ vektor a grafit sík $\boldsymbol{a}_1$ és $\boldsymbol{a}_2$ egységvektorainak (n, m) szorzói segítségével egyértelműen azonosítja a szén nanocsövet (Dresselhaus, 1996).

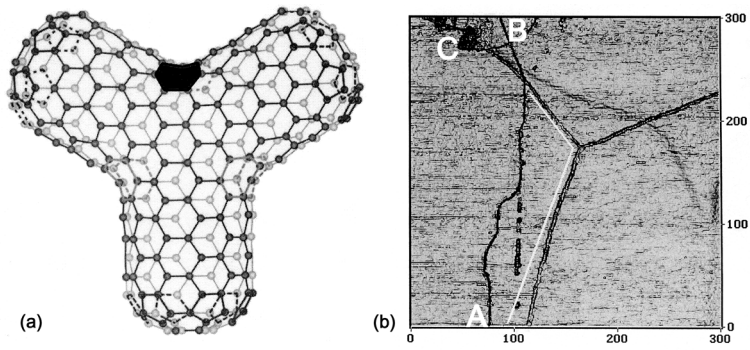
Az egyenes, többfalú szén nanocsöveket Sumio Iijima fedezte fel elektromos ívfényben előállított, ún. „fullerén-koromban" (Iijima 1991). Ez az anyag, amelyből oldószeres extrakció útján nyerhető ki a C_{60}, változatos szénformákat tartalmaz, a fulleréntől a „szénhagymákon" és amorf szénen át a többfalú szén nanocsövekig. A reakciótér paramétereivel (a gáztér nyomása, az alkalmazott gáz, stb.) befolyásolható, melyik szén-fajta felé tolódik el az egyensúly. Itt érdemes megjegyezni, hogy csak hatszöges gyűrűkkel nem lehetséges a C_{60} vagy magasabb fullerének képződése. Ezeknek a zárt, háromdimenziós szénkalickáknak a kialakulása nem képzelhető el anélkül, hogy ötszöges gyűrűket építenénk be a hatszögek közé ***(1. ábra.)*** Az ötszöges gyűrűk idézik elő a felület pozitív görbületét, ami a zárt alakzat kialakulásához vezet. Ebben az értelemben, a fullerén a grafitra jellemző (három szomszéddal rendelkező sp^2 hibridizációjú „háló") szén-szén köté-

sek bizonyos mértékű átrendeződésének eredménye, mivel a „szabályos" grafitban nincsenek ötszögek.

Nem sokkal később, elméleti munkák újszerű, sp^2 hibridizációjú hálókból felépíthető szén nanoszerkezetek létét vetítették előre: nanométeres Y elágazások (Scuseria, 1992; Chernozatonskii, 1992), nanocső könyökök (Dunlap, 1992), tóruszok (Ihara, 1993a) és tekercsek (Dunlap, 1992; Ihara, 1993b) lehetséges voltára mutattak rá a modellek és számítások. Mint a C_{60} esetében, ezeknek a szerkezeteknek is közös vonása, hogy kialakulásukhoz elengedhetetlenül szükséges nem hatszöges gyűrűk beépítése a hatszöges grafitszerkezetbe.

Érdekes, de talán nem véletlenszerű módon, a fent említett komplex alakú szén nanocső architektúrák közül a katalitikus módszerrel előállított többfalú szén nanocső tekercseket figyelték meg először kísérletileg (Amelinckx 1994), majd ugyancsak katalitikus módszerrel előállított mintában sikerült kimutatni egyfalú nanocső tekercseket is (Biró 2000).

Az Y-szerű elágazások esetére több szerkezeti modellt is kidolgoztak (Scuseria, 1992; Chernozatonskii, 1992; Andriotis, 2001a; Andriotis, 2001b). Ezek közül az elsők egyike a legegyszerűbb *(2. ábra):* az elágazás úgy jön létre, hogy a tökéletes hatszöges szerkezetbe meghatározott helyen, jól meghatározott elrendeződésben hat darab hétszöges gyűrű épül be. Az így keletkező Y szimmetrikus, szárai 120° szöget zárnak be egymással, *(2. ábra).* A grafit hordozón fullerén bomlásából nyert szénsugárból előállított (Biró, 1999), azaz, nem alumíniumoxid, vagy egyéb templátban (template) képződött (Li, 1999), szimmetrikus elágazások (Biró, 2002a) esetében előfordulhatnak kisebb eltérések a szárak közötti szögekben, de a szimmetrikus elágazások jól megkülönböztethetők az elektromos ívben növesztett aszimmetrikus elágazásoktól (Osváth, 2002). A kísérleti eredmények arra utalnak, hogy a szimmetrikus és aszimmetrikus elágazások növekedése eltér egymástól. Az aszimmetrikus elágazások esetében általában egy vastagabb szár két vékonyabb ágra bomlik. Esetenként megfigyelhető, hogy a növekedő nanocső instabilitást mutat, az azonosítható szerkezeti hibák sorozata vagy könyök előzi meg az Y elágazást *(3. ábra)* (Osváth, 2002). Ezzel szemben a szimmetrikus elágazásokra jellemző, hogy az elágazásból kiinduló ágak közel azonos átmérőjűek (Biró 2002a). Ez arra enged következtetni, hogy a növekedés a csatlakozási pontból indul. A fullerén bomlása útján előállított, alacsonyhőmérsék-

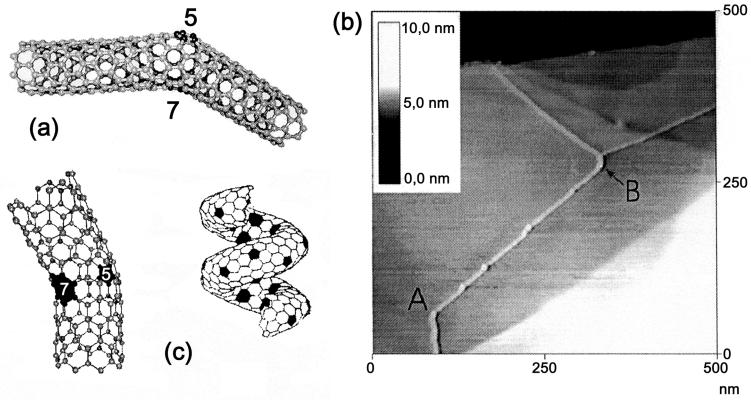


2. ábra • a) Y elágazás szerkezeti modellje (Scuseria, 1992) nyomán, az egyik hétszög sötét kitöltéssel kiemelve; b) egyfalú Y elágazásról készített alagútmikroszkópos felvétel szimulált megvilágítással ábrázolva (Biró, 2002a).

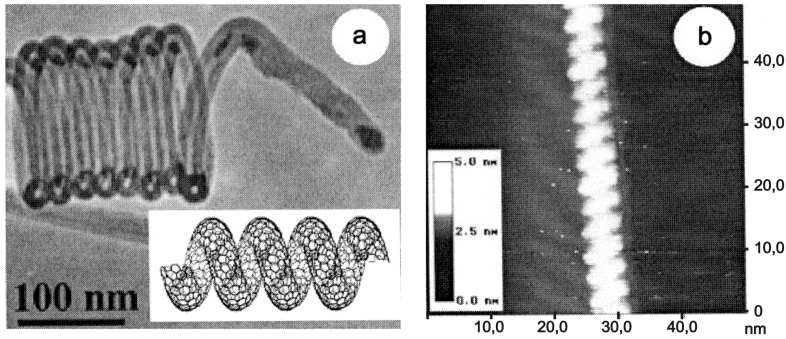
letű szénsugárból növesztett nanoszerkezetek esetében a tömegspektrométeres mérések megmutatták, hogy a szénsugár fullerénéhez közeli tömegű klasztereket is tartalmaz (Ehlich 2001). Esetenként, az ezekben jelenlévő nem hatszöges gyűrűk elrendeződése lehet olyan, amely indukálja az Y elágazás növekedését.

A nanocső könyök *(3. ábra)* az Y elágazásnál egyszerűbb szerkezet, kialakulásához elégséges lehet egy ötszög-hétszög páros beépülése a hatszöges hálóba. A könyök két karja által bezárt szöget az ötszög és hétszög egymáshoz viszonyított helyzete határozza meg (Han, 1998). Egyik legtipikusabb példája az ún. Dunlap-könyök (Dunlap, 1992) *(3. ábra),* amelyet egy-egy, a cső átellenes oldalain elhelyezkedő ötszög és hétszög alkot, úgy, hogy a könyök egyik ágában cikkcakk elrendezésűek a szén-szén kötések, míg a másikban karosszék elrendezésűek. Érdemes kiemelni, hogy könyök kialakulásával csatlakozhatnak egymáshoz fémes és félvezető viselkedésű nanocsövek, ami nanométeres léptékű diódát eredményez (Yao, 1999).

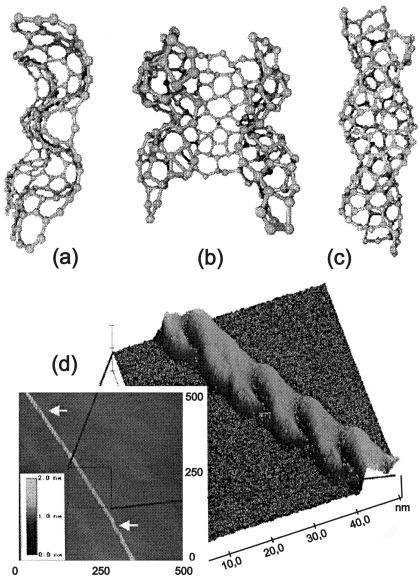
Röviddel a nanocsövek felfedezése után, már 1992-ben olyan modelleket dolgoztak ki, amelyek az ötszög-hétszög párosoknak a hatszöges rácsba való periodikusan ismételt beillesztésével spirálisan feltekert nanocső alakzatok lehetséges voltát vetítették előre (Dunlap, 1992; Ihara, 1993b). Ezek a modellek a nem hatszöges gyűrűket a tökéletes hatszöges rácsba beépült „hibaként" kezelik. Egy ilyen szerkezeti modell lényegében periodikusan ismétlődő könyökökből épül fel *(3. ábra).* Bár a molekuladinamikai számítások azt mutatják, hogy nanocső spirálokra kidolgozott modellek várhatóan a fullerénével összemérhető stabilitással rendelkeztek, nem sikerült elfogadható magyarázatot adni arra, hogyan épülnek be a hatszöges, grafitszerű szerkezetbe ***tökéletesen periodikusan ismétlõdve***, elszigetelt, nem hatszöges gyűrűk, azaz a hibák. Ennek ellenére, a transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) és pásztázó alagútmikroszkópos (STM) felvételek kétséget kizáróan igazolják, hogy léteznek szabályos, spirálisan feltekert nanocsövek – többfalúak (Amelinck,



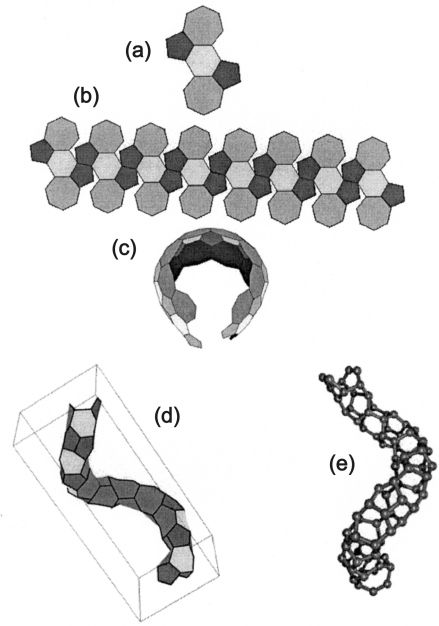
3. ábra • Nem hatszöges gyűrűket tartalmazó szerkezetek. a) Dunlap-könyök szerkezeti modellje, az öt- és hétszöget alkotó atomok feketén ki vannak emelve; b) elektromos ívkisülésben előállított Y elágazás STM képe, amelynek kialakulását könyökök (A és B), valamint növekedési instabilitások (világosabb, azaz nagyobb alagútáramnak megfelelő pontok a nanocső mentén) előzték meg (Osváth, 2002); c) nanocső könyökök összeillesztésével, egymástól elszigetelt, nem-hexagonális gyűrűk segítségével felépített nanocső tekercs modell (Dunlap, 1992) és (Ihara, 1993b) nyomán.



4. ábra • Szén nanocső tekercsek. a) Többfalú szén nanocső spirál TEM felvétele (Biró, 2000) nyomán. b) Egyfalú szén nanocső spirál topográfiai STM felvétele (Biró, 2002b) nyomán.



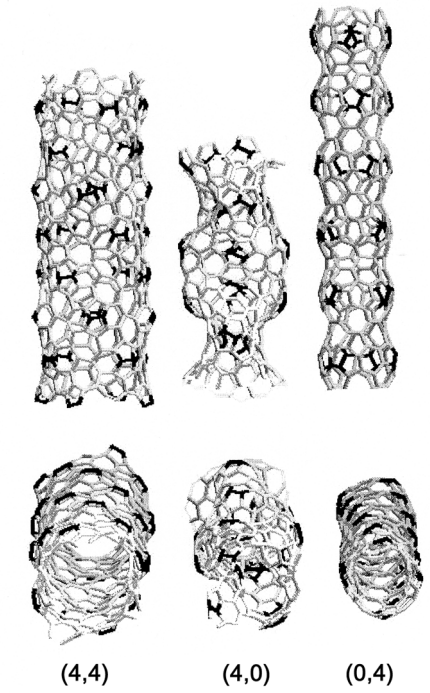
5. ábra • Szén nanocső „duplaspirálról" készült STM felvétel, és szerkezeti modell. a) Kényszerfeltétel nélkül relaxáltatott haeckelite lap; b) ugyanaz a lap enyhe kezdeti görbülettel relaxáltatva; c) a b)-ben bemutatott felület összecsukásával nyert duplaspirál-szerkezet; d) duplaspirálról készült topográfiai STM felvétel (Biró, 2002c) nyomán.



6. ábra • Haeckelite típusú egység, szalag és felület. a) Egy hatszöggel elválasztott két azulenoid elemből álló egység; b) az egység egyik lehetséges elrendezésével épített szalag; c) a b)-ben látható szalagot alkotó sokszögek éleinek összeillesztésével létrehozott görbült felület, a felület belső oldalát jelölő szürke árnyalatok sötétítettek; d) és e) a c)-ben ábrázolt felület csővé zárásával keletkező szabályos nanocső spirál kétféle ábrázolásban (Biró, 2002c) nyomán.

1994) és egyfalúak egyaránt (Biró, 2000; Biró, 2002b) *(4. ábra)*.

Egy további kérdés, amelyre még kevésbé tud kielégítő választ adni a nem hatszöges gyűrűket elszigetelt hibákként kezelő szerkezeti modell: milyen a szerkezetük, és hogyan alakulnak ki a többszörös spirálok? A *5. ábrán* egy ilyen, a DNS szerkezetét idéző „duplaspirálról" készült STM felvétel látható (Biró, 2002c). A közelmúltban két kutatócsoport is beszámolt arról, hogy sajátos körülmények között sikerült többszörös szén nanocső spirálokat növeszteniük (Su, 2002; Ding, 2003).



7. ábra • A két ötszög-hétszög (azulenoid gyűrűpár) csoportot három hatszöggel elválasztó haeckelite egység alapján épített haeckelite síkból feltekert néhány csőszerű alakzat. A feketével kiemelt kötések a két ötszög közös élén keletkező „sztresszorokat" jelölik, ezek eloszlása határozza meg az alakzat által a relaxáció után felvett formát (Lambin, 2003) nyomán.

A megoldást egy olyan grafitszerű, sp^2 koordinációjú felület adhatja meg, amelyben közel hasonló arányban vannak jelen ötszögek, hatszögek és hétszögek. Nemrégiben Humberto Terrones és munkatársai (Terrones, 2000) javasoltak haeckelite néven egy ilyen lehetséges anyagot, és vizsgálták az ilyen típusú felületekből feltekerhető egyenes nanocsövek szerkezetét, stabilitását és elektromos tulajdonságait. Megállapították, hogy a haeckeliteből feltekert egyenes nanocsövek stabilitása hasonló a grafénből tekert nanocsövekéhez, és valamennyi általuk vizsgált szerkezet fémes elektron-állapotsűrűséggel rendelkezik (Terrones, 2000). Ezzel a munkával közel egy időben László István és André Rassat (László, 2001) kimutatták, hogy csak ötszögek és hétszögek segítségével is építhető stabil, ún. azulenoid tórusz.

Fenti eredmények általánosításával Biró és munkatársai kimutatták, hogy az azulenoid „egységek" (oldaluk mentén összekapcsolt ötszög és hétszög) hatszögekkel történő bővítésével, és a bővített egységek szalagokká egyesítésével olyan haeckelite szerkezetek is építhetők, amelyek megfelelő módon való feltekeréssel szabályos nanocső spirálokhoz vezetnek (Biró, 2002c) *(6. ábra)*. Az *5. ábrán* látható, hogy a hosszabbik élük mentén összeillesztett két haeckelite szalagból nyert felületek zárt csővé alakítása duplaspirálhoz vezet. Egy későbbi munkában Lambin és munkatársai kimutatták, hogy a fenti elvek alapján felépíthető haeckelite szalagok végtelen kiterjedésű haeckelite felületekké egyesíthetők, amelyekből azonos elvek szerint tekerhetők fel a csőszerű nanoszerkezetek, mint a grafén síkból az egyenes nanocsövek (Lambin, 2003). E nanoszerkezetek a nem hatszöges gyűrűk jelenlétéből adódó feszültségek következtében változatos alakokat vehetnek fel. Jellegzetes alakzatok a *7. ábrán* láthatók.

Összefoglalásul: a modellek és kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy a csak szénből felépülő, a grafithoz hasonlóan

sp^2 hibridizációjú rétegből feltekerhető csőszerű szerkezeteknek gyakorlatilag korlátlan a formagazdagságuk, ami azt is jelenti, hogy lehetséges többrétegű, csőszerű alakzatok felépítése is belőlük. A fent részletezett eredmények tükrében indokoltnak látszik felvetni a kérdést, hogy a katalitikus módszerekkel előállított szén nanocsövek, amelyekről köztudott, hogy az elektromos ívben előállított egyenes szén nanocsövektől eltérően véletlenszerűen görbültek, grafén vagy haeckelite alapúak-e? Valószínűnek látszik, hogy a szén alapú, bonyolultabb nanoarchitektúrák száma, amelyek a szerkezetükből fakadó újszerű tulajdonságokkal rendelkeznek, tovább fog növekedni a kutatások folytatásával. Bár a szén alapú nanoarchitektúrák (Y elágazás, nanocső tekercs, stb.) tulajdonságainak feltérképezése éppen csak elkezdődött, az eddigi eredmények azt mutatják, hogy újszerű nanoelektronikai eszközök és különleges tulajdonságú kompozitok létrehozását teszik majd lehetővé.

Jelen munka az OTKA T 043685 támogatásával készült.

Kulcsszavak: *szén nanocső, fullerén, sp^2 háló, Y elágazás, nanocső tekercs, haeckelite, pásztázó alagútmikroszkóp (STM)*

IRODALOM

Amelinckx, Severin – Zhang, X. B. – Bernaerts, D. – Zhang, X. F. – Ivanov, V. – Nagy J. B. (1994). A Formation Mechanism for Catalytically Grown Helix Shaped Graphite Nanotubes. Science 265, 635.

Andriotis, Antonis N. – Menon, M. – Srivastava, D. – Chernozatonskii, L. A. (2001a). Ballistic Switching and Rectification in Single Wall Carbon Nanotube Y Junctions. Applied Physics Letters. 79, 266–268.

Andriotis, Antonis N. – Menon, M. – Srivastava, D. – Chernozatonskii, L. (2001b). Rectification Properties of Carbon Nanotube "Y-Junctions". Physical Review Letters. 87, 066802-1–066802-4

Baughman, Ray H. – Zakhidov, Anvar A. – De Heer, Walt A. (2002). Carbon Nanotubes – The Route Toward Applications. Science 297, 787-792.

Biró László Péter – Ehlich, R. – Tellgmann, R. – Gromov, A. – Krawez, N. – Tschaplyguine, M. – Pohl, M. M. – Zsoldos E. – Vértesy Z. – Horváth Z. E. – Campbell, E. E. B. (1999). Growth of Carbon Nanotubes by Fullerene Decomposition in the Presence of Transition Metals. Chemical Physics Letters. 306, 155-162.

Biró László Péter – Lazarescu, S. D. – Thiry, P. A. – Fonseca, A. – B. Nagy J. – Lucas, A. A. – Lambin, Ph. (2000). Scanning Tunneling Microscopy Observation of Tightly Wound, Single-Wall Coiled Carbon Nanotubes. Europhysics Letters. 50, 494-500.

Biró László Péter – Bernardo, C. A. – Tibbets, G. G. – Lambin, Ph. (eds.) (2001). *Carbon Filaments and Carbon Nanotubes: Common Origins, Differing Applications?* Kluwer Academic Publishing, Dordrecht

Biró László Péter – Ehlich R. – Osváth Z. – Koós A. A. – Horváth Z. E. – Gyulai J. – B. Nagy J. (2002a). From Straight Carbon Nanotubes to Y-Branched and Coiled Carbon Nanotubes; Diamond and Related Materials. 11, 1081-1085.

Biró László Péter – Ehlich, R. – Osváth Z. – Koós A. – Horváth Z. E. – Gyulai J. – B. Nagy J. (2002b). Room Temperature Growth of Single-Wall Coiled Carbon Nanotubes and Y-Branches. Materials Science and Engineering C. 19, 3-7.

Biró László Péter – Márk G. I. – Koós A. A. – B. Nagy J. – Lambin, P. (2002c). Coiled Carbon Nanotube Structures with Supraunitary Nonhexagonal to Hexagonal Ring Ratio. Physical Review B. 66, 165405-1–165405-6

Braun Tibor (1996). *A Káprázatos C_{60} Molekula.* Akadémiai, Budapest

Chernozatonskii, Leonid A. (1992). Carbon Nanotube Connectors and Planar Jungle Gyms. Physics Letters A. 172, 173-176.

Ding, Dongyan Y. – Wang, J. N. – Cao, Z. L. – Dai, J. H. – Yu, F. (2003) Ni–Ni_3P Alloy Catalyst for Carbon Nanostructures. Chemical Physics Letters. 371, 333-336.

Dresselhaus, Mildred S. – Dresselhaus, Gene – Eklund Peter C. (1996). *Science of Fullerenes and Carbon Nanostructures.* Academic Press, San Diego

Dresselhaus, Mildred S. – Dresselhaus, Gene – Avouris, Phaedon (eds.) (2001). *Carbon Nanotubes Synthesis, Structure, Properties, and Applications.* Springer, Berlin

Dunlap, Brett I. (1992). Connecting Carbon Tubules. Physical Review B. 46, 1933-1936.

Ehlich, Rudolf – Biró L. P. – Stanciu, C. – Horváth Z. E. – Gyulai J. (2001). *Molecular Nanostructures* in Kuzmany, Hans – Fink, J. – Mehring, M – Roth, S. (eds.) (XVth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials. An Euroconference. American Institute of Physics Proceedings Series, Vol. 591, 175-178.

Han, Jie – Anantram, M. P. – Jaffe, R. – Dai, H. (1998). Observation and Modeling of Single Wall Carbon Nanotube Bend Junctions. Physical Review B. 57, 14983-14989.

Ihara, Sigeo – Itoh, Satoshi – Kitakami, Jun-ichi (1993a). Toroidal Forms of Graphitic Carbon. Physical Review B. 47, 12908-12911.

Ihara, Sigeo – Itoh, Satoshi – Kitakami, Jun-ichi (1993b). Helically Coiled Cage Forms of Graphitic Carbon. Physical Review B. 48, 5643-5647.

Iijima, Sumio (1991). Helical Microtubules of Graphitic Carbon. Nature. 345, 56-58.

Kónya Zoltán – Biró L. P. – Hernádi K. – B. Nagy J. – Kiricsi I. (2001). *Szén nanocsövek elõállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetõségei*. Akadémiai, Bp.

Kroto, Harold W. – Heath, J. R. – O'Brien, S. C. – Curl, R. F. – Smalley, R. E. (1985). C_{60}: Buckminsterfullerene. Nature. 318, 162-163.

Lambin, Philippe – Márk Géza I. – Biró László Péter (2003). Structural and Electronic Properties of Coiled and Curled Carbon Nanotubes Having a Large Number of Pentagon–Heptagon Pairs. Physical Review B. 67, 205413-1–25413-9

László István – Rassat, André (2001). Toroidal and Spherical Fullerene-Like Molecules with Only Pentagonal and Heptagonal Faces. International Journal of Quantum Chemistry. 84, 136-139.

Li, Jing – Papadopoulos, Chris – Xu, Jimmy M. (1999). Growing Y-Junction Carbon Nanotubes. Nature. 402, 253-254.

Mintmire, John W. – Dunlap, Brett I. – White, Carter T. (1992). Are Fullerene Tubules Metallic? Physical Review Letters. 68, 631-634.

Osváth Zoltán – Koós A. A. – Horváth Z. E. – Gyulai J. – Benito, A. M. – Martínez, M. T. – Maser, W. K. – Biró L. P. (2002). Arc-Grown Y-Branched Carbon Nanotubes Observed by Scanning Tunneling Microscopy (STM). Chemical Physics Letters. 365, 338-342.

Saito, Riichiro – Fujita, M. – Dresselhaus, G. – Dresselhaus, M. S. (1992). Electronic Structure of Chiral Graphene Tubules. Applied Physics Letters. 60, 2204-2206.

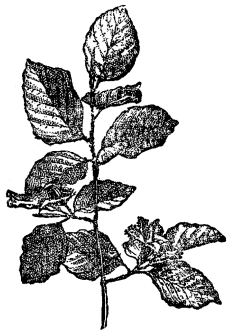
Scuseria, Gustavo E. (1992). Negative Curvature and Hyperfullerenes. Chemical Physics Letters. 195, 534-536.

Su, C-J. – Hwang, D. W. – Lin, S-H. – Jin, B-Y. – Hwang, L-P. (2002): Self-Organization of Triple-stranded Carbon Nanoropes. PhysChemComm. 5, 34-36.

Treacy, Michael M. J. – Ebbesen, Thomas W. – Gibson, John M. (1996). Exceptionally High Young's Modulus Observed for Individual Carbon Nanotubes. Nature 381, 678-680.

Terrones, Humberto – Terrones, M. – Hernandez, E. – Grobert, N. – Charlier, J-C. – Ajayan, P. M. (2000). New Metallic Allotropes of Planar and Tubular Carbon. Physical Review Letters. 84, 1716-1719.

Yao, Zhen – Postma, H. W. Ch. – Balents, L. – Dekker, C. (1999). Carbon Nanotube Intramolecular Junctions. Nature. 402, 273-276.



DIFFÚZIÓ NANOSKÁLÁN

Beke Dezső
a fizikatudomány doktora
dbeke@delfin.klte.hu

Erdélyi Zoltán
PhD

Szabó István
a fizikatudomány kandidátusa

Cserháti Csaba
PhD

Langer Gábor
a fizikatudomány kandidátusa

Daróczi Lajos
PhD

Debreceni Egyetem, Szilárdtest Fizika Tanszék

Bevezetés

Diffúzió nanokristályos anyagokban több szempontból is fontos és érdekes. Fontos, mert a nanotechnológiai folyamatokat, illetve a nanoszerkezetek stabilitását meghatározó egyik alapjelenségről van szó, és érdekes, mert új alapkutatási kérdéseket is érint. Korábban széles körben elfogadott volt az a nézet, hogy például egy újabb félvezető integrált áramköri egységben a kívánt koncentrációeloszlás kialakításához, vagy a kialakított eloszlás időbeli stabilitásának becsléséhez elegendő elővenni számítógépünket, be kell táplálni a megfelelő adatokat és – minthogy a diffúzió alapegyenleteit, a Fick egyenleteket, ismerjük – „csak meg kell várni, amíg az ismert egyenletek megoldását megkapjuk". Eszerint az alapelveket ismerjük, és mint „szerszámokat" alkalmazhatjuk, legfeljebb a technológiai problémák bonyolultsága okozhat némi fejtörést.

A nanoszerkezetű anyagok két csoportjának diffúziós viselkedését (térfogati nanokristályos anyagok diffúziós átjárhatósága (permeabilitása); multirétegek termikus stabilitása, illetve térfogati diffúzió néhány nanométeres távolságokon) szeretnénk bemutatni, amelyek azt is bizonyítják, hogy az eddig elfogadott alapegyenletek érvényességi körét nem mindig lehet nanoskálára automatikusan kiterjeszteni, és új, tipikusan „nanodiffúziós" jelenségek is léteznek.

A vizsgált nanoszerkezetek sajátosságai

Térfogati nanokristályos anyagok

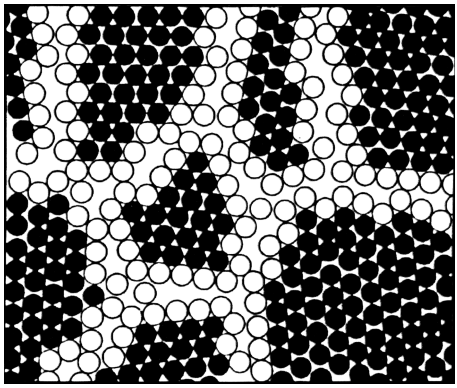
Az utóbbi húsz év nanotechnológiai sikereinek köszönhetően többféle módon is előállítható akár tömbi nanokristályos próbatest (amelyben a szemcsék átmérője a 10 nm nagyságrendjébe, vagy esetleg az alá esik) is. Az ***1. ábrán*** látható, hogy a szemcsék belsejében szabályos, az ideális kristályokhoz közeli, atomi rend van, míg a közöttük lévő szemcsehatárok atomi szerkezete jelentősen rendezetlenebb (de általában nem teljesen rendezetlen, azaz nem amorf), és függ attól is, hogy a szomszédos szemcsék mennyire vannak egymástól elfordulva. A nanokristályos anyagok termikus stabilitása, a hőkezelések hatására bennük végbenő atomi átrendeződések ismerete a technológia számára is alapvető. Egyik legfontosabb csoportjuk a ma már tonnaszámra gyártott amorf szalagok részleges átkristályosításával előállított mágneses szűrők és relék; ilyen technológiák fejlesztésében tanszékünk is részt vesz – a Magnetec Ungarn cég gyöngyösi üzemével közösen –

a *Nanotechnológia* című NKFP pályázat (064/2001, konzorciumvezető Gyulai József) keretében. Ezekben az anyagokban amorf mátrixban „úsznak" a más összetételű és fázisú, nanokristályos szemcsék.

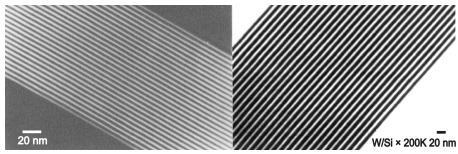
Diffúziós szempontból itt az is érdekes, hogy az atomok mozgékonysága (D diffúziós együtthatója) több nagyságrenddel különbözik a szemcsék belsejében, illetve a határokban. Minthogy az atomok vándorlásához kristályhibák (leggyakrabban üres rácshelyek) szükségesek, D nyilván a határokban a nagyobb ($D_h / D > 10^5$), és az is ismert, hogy D_h még az amorf állapotban mérhető értékeknél is nagyobb (Beke, 1995). Ezért például a félvezető integrált áramkörökben ott, ahol fém-félvezető kontaktus kialakítására van szükség, néhány nanométer vastag amorf diffúziós „gátat" építenek be, hogy elkerüljék a fématomok nemkívánatos diffúzióját a félvezetőbe. Más szóval az amorf réteg diffúziós permeabilitása jóval kisebb, mint egy nanokristályos filmé.

Multirétegek

A multirétegek nanoskálán egyirányban kémiailag modulált szerkezetek *(2.ábra),* ahol az egymást követő rétegek vastagsága, vagy a periódushossz szintén általában kisebb,



1. ábra • Nanokristályos anyag atomi szerkezete sematikusan. Az üres körök a szemcsehatárokban lévő atomok.



2. ábra • a) amorf Si/Ge multiréteg; b) kristályos W/amorf Si multiréteg transzmissziós elektronmikroszkópos képe (a világos csíkok a Si-nak felelnek meg).

mint 10 nm. Amorf Si/Ge multirétegről készült transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvételt láthatunk a *2a. ábrán* (a világos csíkok a Si, a sötétek a Ge rétegeket ábrázolják). A multirétegek gyakorlati alkalmazása igen széleskörű, speciális mágneses, elektromos vagy éppen optikai tulajdonságaik miatt. Ha az egyes rétegek vastagsága valamely kritikus hossz közelébe kerül (például az elektronok szabad úthossza; mágneses kicserélődési kölcsönhatás távolsága stb.), akkor számos új fizikai tulajdonság figyelhető meg, ami a nagy számban jelenlévő határfelületekre, vagy éppen az egyedi rétegek vastagságának véges méretére vezethető vissza (Ohring, 1992). Ma már igen elterjedt a multirétegek alkalmazása röntgentükrökként is, ahol a két réteg között meglevő nagy elektronsűrűség-különbség miatt a röntgensugárzásnak a határfelületeknél történő szóródását használják fel (például a *2b. ábrán* mutatott W/Si multiréteg alkalmas erre). A röntgensugarak kis hullámhossza miatt szükséges, hogy a rétegek vastagsága a nanométeres tartományba essen, és a határfelületek élesek legyenek. Ezért lényeges gyakorlati probléma, hogy hogyan készíthető nagyszámú, kívánt vastagságú réteg párhuzamos réteghatárokkal.

Az utóbbi években jelentős az olyan multirétegek kutatása, amelyek alkalmasak lehetnek az információs technológia számára adattárolásra, illetve kiolvasásra. Adatkiolvasáshoz azt lehet felhasználni, hogy a 'ferromágneses - nem mágneses' anyagból készült rétegrendszernek mágneses térben, ill. tér

nélkül jelentősen különbözik az ellenállása (GMR - óriás mágneses ellenállás). E technika rohamos fejlődését mutatja, hogy a GMR közel 2 évtizedes felfedezése után ma már a számítógépek adattároló lemezeinek kiolvasására 90 %-ban ilyen olvasófejeket alkalmaznak: a forgó diszken lévő mágneses jelek az olvasófej előtt elhaladva (annak ellenállását megváltoztatva) elektromos jelet keltenek.

A multirétegek az egyensúlyi (a homogén) állapothoz képest jelentős szabadenergiafelesleggel rendelkeznek, ami a határfelületek és a feszültségek energiájából, valamint a kémiai energiafeleslegből tevődik össze. Ebből adódóan az ilyen rendszerek hajlamosak a különböző átalakulásokra. A leggyakoribb szerkezeti változások a diffúziós keveredés, illetve szilárdtest reakciók a két anyag között. E folyamatok adott anyagpár esetén akár szobahőmérsékleten, de a különböző eszközökbe beépítve a működés közben fellépő hőterhelésből adódóan is, végbemehetnek. Következésképpen e rendszerek termikus stabilitását és szerkezeti változásait befolyásoló paraméterek (például diffúziós együttható) ismerete igen fontos az élettartam előrevetítése szempontjából.

Multirétegek előállítása elsősorban magnetronos porlasztással vagy molekulasugár epitaxia (MBE) módszerével történhet. Az első esetben nagytisztaságú argonban elhelyezett két céltárgy Ar ionokkal való bombázásával lehet igen pontosan ellenőrzött váltakozó kémiai összetételű rétegeket leválasztani (a mágneses tér a céltárgy mögött van, és éppen ez teszi lehetővé a finom leválasztást). A másik módszer mintegy egy nagyságrenddel drágább, viszont koherens határfelületek kialakítását teszi lehetővé, továbbá biztosítható, hogy az egyedi filmek nem tartalmaznak szemcsehatárokat sem. A '90-es évek elején a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizika Tanszékén megépült egy olyan magnetronos porlasztó berendezés, mely jó minőségű, éles határfelületekkel rendelkező multirétegek előállítását tette lehetővé, megteremtve ezzel – Magyarországon először – a lehetőséget ilyen rendszerek hazai kutatására.

Diffúzió nanokristályos anyagokban

A diffúziót lehet külön is vizsgálni a szemcse- vagy fázishatárok (ha a szomszédok két különböző fázis szemcséi) mentén ***(1. ábra).*** A szemcse-, illetve fázishatár menti diffúzió klasszikus tárgyalásaiból jól ismert, hogy három diffúziós rezsimet lehet megkülönböztetni (Bernardini – Beke, 2001). ***C*** rezsimben a diffúzió csak a határok mentén történik, ***B*** rezsimben van diffúzió a határokra merőlegesen a szemcsék belsejébe is, míg ***A*** rezsimben a szemcsékbe befolyó áramok diffúziós terei átlapolnak. Az ***1. ábra*** alapján érthető, hogy nanokristályos anyagokban, a hőkezelési időtől függően, az ***A,*** illetve ***C*** rezsim lesz a fontos, és a mikrokristályos mintákban 80-90 %-ban megvalósuló ***B*** rezsim nem is érhető el (Bernardini – Beke, 2001), hiszen a szemcsékben az átlapolás nagyon gyorsan megtörténik. ***A*** rezsimben tehát a diffúziós keveredés vagy a diffúzió által lehetővé tett szilárdtest reakció (például felületi ötvözés vagy vékonyfilm-reakciók) egy jelentős gyorsulása figyelhető meg. Ugyanakkor igen sok esetben (***C*** típusú rezsimek) a folyamat csak a szemcse- vagy fázishatárok mentén megy végbe. Például vékony nanokristályos filmek vagy multirétegek degradációja szemcsehatárok befűződésével, majd szemcsehatár-áthidalások vagy izolált szemcsék keletkezésével és ezek durvulásával történik, és gyakran a szilárdtest reakciók is ilyen effektív együtthatóval zajlanak.

Jelenleg is vitatott az irodalomban hogy a nanokristályos anyagokban mért szemcsehatár diffúziós együtthatók megegyeznek-e a mikrokristályos állapotban mért értékekkel vagy sem (Bernardini – Beke, 2001). Az megállapítható, hogy nanokristályos anyagokban a – gyártási körülményektől is füg-

gően – kialakuló nem-egyensúlyi szemcsehatár-szerkezetek könnyen és gyorsan relaxálnak, és szerkezetük is és a diffúziós együtthatók is jól egyeznek a mikrokristályos anyagok szemcsehatáraiéval. A vitatott pont az, hogy a relaxáció ideje és a diffúziós idő viszonya milyen, és reális kísérletekben ez mennyire figyelhető meg.

Nanométeres diffúziós úthosszak

Néhány érdekes „mérethatás"

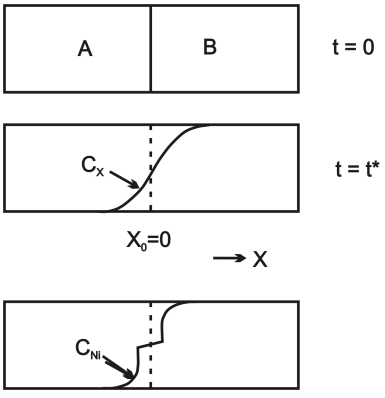
Sok esetben – például molekula sugár epitaxia (MBE) módszerével növesztett vékony filmekben vagy multirétegekben – a térfogati diffúziós távolságok rövidebbek lesznek, mint a diffúziós hibák (például vakanciák) forrásai és nyelői közötti távolságok. „Normális" diffúzióban ezeknek a hibáknak az egyensúlyi koncentrációját a források és nyelők állítják be, ha a közöttük lévő átlagos távolság sokkal kisebb, mint $L=(D\,t)^{1/2}$ (t a hőkezelési idő). Ellenkező esetben a diffúziós mechanizmus megváltozhat, mint ahogy ezt meg is figyelték bizonyos szennyezőkre – ugyan nanométeresnél nagyobb méretskálán – diszlokációmentes szilíciumban (Bernardini – Beke, 2001).

A *3. ábra* mutatja sematikusan egy diffúziós párban a kiindulási koncentrációt, illetve a koncentráció-eloszlást adott hőkezelési idő után akkor, ha a két kiindulási anyag egymást korlátlanul oldja szilárd állapotban (szilárdoldat keletkezik), illetve, ha a diffúzió során új szilárd fázisok keletkeznek. A *4. ábra* mutat egy példát az utóbbi esetre.

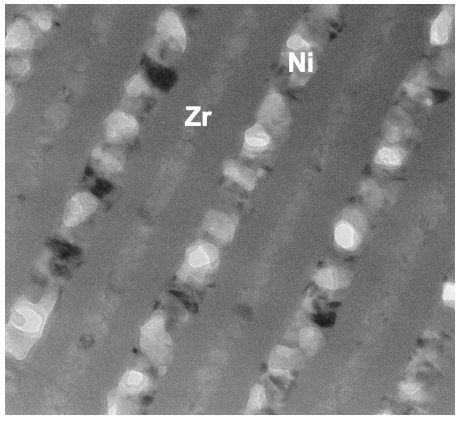
Ismert, hogy egy új fázis nukleációjakor (ahogy a sókristályok kikristályosodnak túltelített oldatból, ha a sóoldatot lehűtjük) mindig van egy kritikus – rendszerint a nanométeres tartományba eső – sugár, és csak az ennél nagyobb kristálymagok képesek növekedésre. Ha például egy szilárdtest reakcióban a diffúziós zóna szélessége, L, kisebb, mint ez a sugár, akkor a fázis nem képződhet. Ha a diffúziós termékek száma egynél több, akkor ez például a könnyen nukleálódó fázisok korai megjelenéséhez vezethet, sőt nem egyensúlyi (amorf) fázis is megjelenhet rövid hőkezelési időknél (lásd a *4. ábrát* is).

Néhány meglepõ nanodiffúziós jelenség

A nanodiffúzió legfontosabb jellemzője – a hosszú távú, azaz az atomi távolságnál *(a)* jóval hosszabb diffúziós úthosszú jelenségekhez viszonyítva – az, hogy a klasszikus (kon-



3.ábra • Koncentráció-eloszlás diffúziós párban ha szilárdoldat keletkezik (középső ábra), vagy ha új fázis növekszik (alsó ábra).



4.ábra • Amorf NiZr fázis keletkezik szilárdtest reakcióban nanokistályos Ni/Zr multirétegben (300 °C-on, 4 óra)

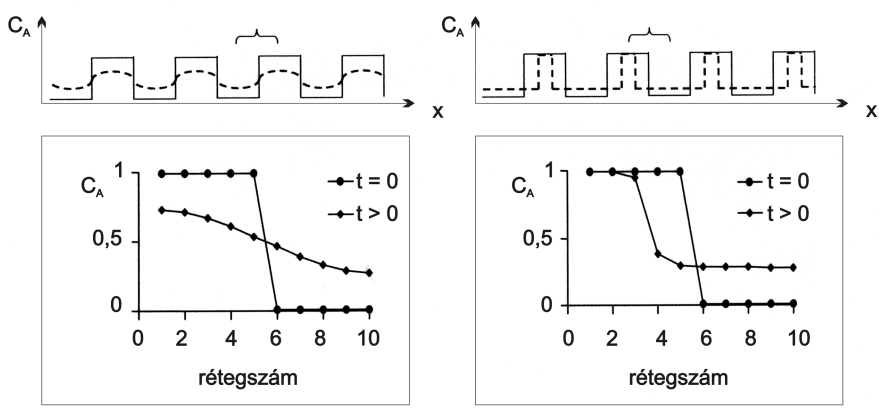
tinuum) diffúziós egyenleteket nem lehet automatikusan alkalmazni. Már évtizedekkel ezelőtt megmutatták, hogy – még akkor is, ha a *D* diffúziós együttható független az összetételtől – ha L<6*a*, diszkrét (atomisztikus) modellt kell alkalmazni. A klasszikus egyenletek „javítása", érvényességük kiterjesztése azért is lényeges lenne (lásd például Beke et al., 2003), mert amorf anyagokban nanoskálán csak az így javított egyenletekre hagyatkozhatunk. Ez egy igen vonzó és még megoldandó nanodiffúziós probléma.

A diffúziós folyamatok atomi/nano szinten történő leírására a következő diszkrét (kristályos szerkezetben érvényes), egydimenziós modellt használhatjuk. Ebben az ún. determinisztikus kinetikus modellben (Beke et al., 2003) a kijelölt irányra merőleges atomi síkok kezdeti (átlagos) összetételének ismeretében számítható az egyes síkok közötti atomi ugrások valószínűsége (ugrási frekvenciája), melyből meghatározható az egyes síkok összetételének időbeli változása. A modell – nevének megfelelően – determinisztikus, azaz a véletlen fluktuációk hatását nem tartalmazza.

Az irodalomban korábban szinte kivétel nélkül elhanyagolták a diffúziós együttható összetétel-függését, ami általában nagyon durva közelítés.

Modellszámításokból azt kaptuk, hogy erősen összetétel-függő *D* esetén a klasszikus egyenletek érvényességi határa akár egy nagyságrenddel is kitolódhat, azaz a 20–50 nm nagyságrendjébe eshet (Erdélyi et al., 1999), tehát ilyenkor nanoskálán a klasszikus diffúziós egyenletek nem használhatók.

Érdekes eredmény volt az is, hogy míg koncentráció-független *D* esetén, a *3. ábrához* hasonlóan, a kezdetben éles határfelületek ellaposodtak, addig *D* összetételfüggésének figyelembevételével a határfelületek továbbra is élesek maradtak, csupán eltolódtak *(5. ábra)* (Erdélyi et al., 1999). Koncentráció-független esetben az eloszlás időben csak annyiban fejlődik másként, hogy a multirétegesen szerkezetben a rétegek végesek, és így gyorsan „feltöltődhetnek", és a végállapot egy AB szilárdoldat. Az éles eltolódás oka, hogy az A atomok diffúziója nagyságrendekkel gyorsabb a B mátrixban, mint az A-ban, és így a B atomok gyakorlatilag



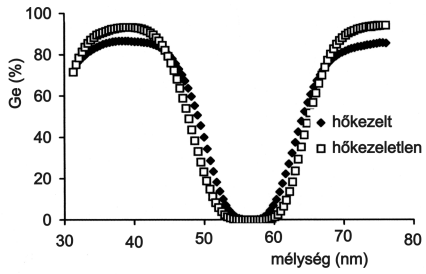
5. ábra • Az összetétel változása a hőkezelés során A/B multirétegben koncentrációtól független, illetve erősen koncentráció-függő *D* esetén (jobb- illetve baloldali ábrák). A felső ábrák sematikusan mutatják a változást, míg az alsó ábrákon a számított összetételek láthatók a kapcsos zárójellel mutatott tartományban két különböző időnél.

nem képesek behatolni az A mátrixba, míg a határfelület közelében levő A atomok könnyűszerrel bediffundálnak B-be, ahol gyorsan eloszlanak. Következésképpen, az A tiszta marad, csupán vékonyodik, míg B egyre inkább feltöltődik A atomokkal, AB szilárdoldatot alkotva, és vastagszik. Ezt, a nanoelektronika egyik ígéretes anyagában, amorf Si-Ge multirétegeken, kísérletileg is megfigyeltük Auger mélységi feltárásos módszer segítségével (Csik et al., 2001). Az MTA MFA-ban kifejlesztett módszer lényege az, hogy ionbombázással lényegében atomi lépésenként tudjuk meghatározni a kémiai összetételt, ha a felületről kiváltott speciális elektronok energiáját elemezzük. A *6. ábrán* látható, hogy a Si a hőkezelést követően elvékonyodott, azonban tiszta maradt, ezzel szemben a Ge feltöltődött Si-mal és megvastagodott.

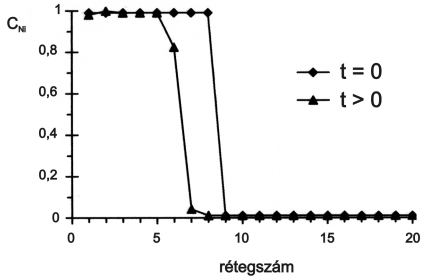
Néhány atomi réteg vastagságú film beoldódását is modelleztük egy félvégtelen mátrixba, ahol a film, illetve a mátrix atomjai szintén korlátlanul oldják egymást, azonban a mátrix atomok sokkal lassabban diffundálnak a filmben, mint a film atomjai a mátrixban. A beoldódás során itt is éles maradt a határfelület, és eltolódott a szabad felület felé *(7. ábra)*. Nem is a határfelület alaktartó (éles) eltolódása volt igazán meglepő, hanem hogy az eltolódás az idővel volt arányos (Erdélyi et al., 2002a) (nem pedig annak négyzetgyökével, mely a klasszikus diffúziós elméletekből várható lenne: parabolikus szabály). Továbbá, hosszabb időknél – néhány száz atomi réteg beoldódása után – gyakorlatilag a parabolikus viselkedés figyelhető meg. Ez mutatja, hogy a talált effektus „nanojelenség": D erős összetételfüggése miatt a beoldódás gyakorlatilag rétegről rétegre történik. Amíg egy atomi réteg be nem oldódik teljesen, addig a rákövetkező réteg beoldódása nem kezdődik el. Így egy ismétlődő folyamat játszódik le, mely átlagosan egy állandó sebességű határfelület-eltolódást eredményez, azaz a határfelület elmozdulása arányos az idővel. Azonban az nem teljesen igaz, hogy amíg a határfelületnél levő réteg be nem oldódik egészen, addig a következő réteg beoldódása nem kezdődik el. Ez a kis „ismétlődési hiba" növekvő hőkezelési időknél egyre inkább halmozódik, míg végül a parabolikus törvényt fogjuk kapni.

A fenti következtetéseket is sikerült igazolnunk néhány atomi réteg vastagságú Ni film felvégtelen Cu mátrixba való beoldódásának Auger elektronspektroszkópos vizsgálatával (Erdélyi et al., 2002a) *(8. ábra)*.

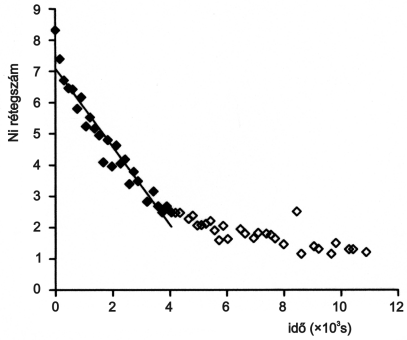
Érdekes lehet továbbá, hogy milyen időfüggést követ a határfelület eltolódása korlátozott oldékonyságú (fázis-szeparációra



6. ábra • Hőkezeletlen, illetve hőkezelt amorf Si/Ge multirétegek Auger mélységi profilja. Látható, hogy a hőkezelt minta esetében a Ge réteg Si-mal töltődött és megvastagodott, miközben a Si réteg tiszta maradt és elvékonyodott.



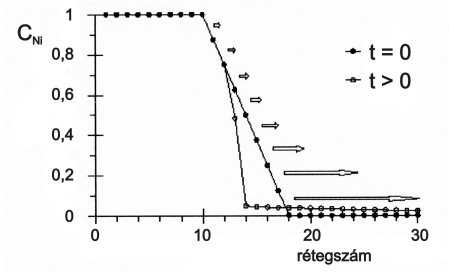
7. ábra • Szimulációs eredmény 10 atomi réteg Ni félvégtelen Cu mátrixba történő beoldódására (az ábrán csupán a felső 20 réz-réteg látható – kezdetben 10 atomi réteg Ni és 10 atomi réteg Cu), két különböző időnél.



8. ábra • A Ni film Auger elektronspektroszkóp segítségével meghatározott vastagságának időbeli változása. Kezdetben 8 atomi réteg vastagságú film volt a Cu mátrixon, melynek vastagsága időben lineárisan csökken.

hajlamos) rendszerekben, ahol a határfelület kémiai okokból éles. Modellszámolásokból azt találtuk, hogy korlátozott oldhatóságú rendszerekben is a nanoskálán eltérések várhatók a klasszikus diffúziós törvénytől (Erdélyi et al., m. a., a), hasonlóan a *7. és 8. ábrán* mutatottakhoz.

Ugyancsak érdekes, hogy mi történik az A illetve a B mátrixot elválasztó, eredetileg elmosott (diffúz, nem éles) határfelülettel, ha A és B kölcsönösen oldják egymást. Ennek megválaszolására az eddigi négyszögletes kiindulási profil helyett olyat választottunk



9. ábra • Eredetileg elmosódott határfelület kiélesedése (szimuláció Ni-Cu rendszerre).

(Erdélyi et al., 2002b), melyben a tiszta A, illetve tiszta B mátrixot egy 10 atomi réteg szélességű határfelület választ el *(9. ábra)*. Mint látható, a határfelület nem laposodik, ahogyan elsőre várnánk, hanem ellenkezőleg, kiélesedik. A jelenség ismét a diffúziós együttható erős koncentráció-függésének következménye. Az ábrán a nyilak érzékeltetik, hogy kis Ni koncentrációnál a diffúzió sokkal gyorsabb.

Érdemes megemlíteni, hogy a határfelületek kiélesedése technológiai szempontból is rendkívül fontos lehet. Ugyanis például az óriás mágneses ellenállású anyagok esetében (például Ni/Cu), vagy a röntgentükröknél (például Mo/Si, Mo/V), nem is beszélve a félvezető iparról (például Si/Ge) rendkívüli jelentőséggel bír a határfelületek minősége. A gyártási tökéletlenségből származó esetlegesen elmosódott határfelületek alacsony hőmérsékleten, rövid idejű hőkezeléssel történő kiélesítése fontos technológiai lépés lehet. Legújabb számításaink azt mutatják, hogy a diffúziós feszültségek a fenti élesedést nem rontják el, legfeljebb az élesedési folyamat lassul le (Erdélyi et al., m. a., b). Előzetes kísérleti eredményeink Mo/V multirétegekben megerősítik a szimulációkból levont következtetéseket.

A Szilárdtest Fizikai Tanszéken folyó kutatásokat számos OTKA. FKFP, NKFP és nemzetközi (EU-s es kétoldali TéT) pályázat keretében elnyert források támogatták és támogatják. Jelenleg a most is folyó, T038125, T043464, F043372 OTKA, 3/064/2001 NKFP és az FKFP-0325/2000 támogatásoknak mondunk köszönetet.

Kulcsszavak: *nano-diffúzió, multirétegek, nanokristályos anyagok, szilárdtest reakciók*

IRODALOM

Beke Dezső L. (1995): Diffusion in Nonequilibrium Marterials in Lendvai János (ed.): Nonequilibrium Materials. Key Engineering Materials. **103**, 51-78.

Beke Dezső L. – Cserháti C. – Erdélyi Z. – Szabó I. A. (2003): Segregation in Nanostructures. in Nalwa, Hari Singh (ed.): *Advances in Nanophase Materials and Nanotechnology. Vol. Nanoclusters and Nanocrystals*. American Scientific Publ., California USA

Bernardini, Jean – Beke, Dezső L. (2001): Diffusion in Nanomaterials in Knauth, Philippe – Schoonman, Joop (eds.): *Nanocrystalline Metals and Oxides: Selected Properties and Applications*. Kluwer Publ., Boston, 41-80.

Csik Attila – Langer G. A. – Beke D. L – Erdélyi Z. – Menyhárd M. – Sulyok A. (2001): Interdiffusion in Amorphous Si/Ge Multilayers by Auger Depth Profiling Technique. Journal of Applied Physics. 89, **1**, 804-806.

Erdélyi Zoltán – Beke D. L. – Nemes P. – Langer G. A. (1999): On the Range of Validity of the Continuum Approach for Non-linear Diffusional Mixing of Multilayers. Philosophical Magazine A. **79,** 1757-1768.

Erdélyi Zoltán – Girardeaux, Ch. – Tőkei, Zs. – Beke, D. L. – Cserháti, C. –Rolland, A. (2002a): Investigation of the Interplay of Nickel Dissolution and Copper Segregation in Ni/Cu (111) System. Surface Science. 496, **1-2**, 129-140.

Erdélyi Zoltán – Katona, G. L. – Beke Dezső L.: Non-parabolic Shift of Phase Boundaries in Binary Systems with Restricted Solubility. Physical Review B. megjelenés alatt, a

Erdélyi Zoltán – Szabó I. A. – Beke D. L. (2002b): Interface Sharpening Instead of Broadening by Diffusion in Ideal Binary Alloys. Physical Review Letters. **89**, 16, 165901-165904.

Erdélyi Zoltán – Beke D. L. (2003): Stress Effects on Diffusional Interface Sharpening in Ideal Binary Alloys. Physical Review B. B68**, 5,** megjelenés alatt, b

Ohring, Milton (1992): *The Materials Science of Thin Films*. Academic Press

FÉM NANORÉSZECSKÉK KATALITIKUS TULAJDONSÁGAI

Guczi László
a kémiai tudomány doktora, MTA Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézet
guczi@alpha0.iki.kfki.hu

Hordozós, közel egyforma méretű fém nanorészecskék előállítása, jellemzése és katalitikus sajátságainak tanulmányozása a 21. század nagy kihívása. Ily módon ugyanis különleges, nagy szelektivitású katalizátorok előállítása válik lehetségessé, továbbá a legmodernebb fizikai és kémiai módszerek felhasználásával a fémkatalízis mechanizmusának megértéséhez is közelebb juthatunk. Munkánkban néhány fizikai (elektronsugaras litográfia – ESL és pulzus lézer párologtatás – PLD technika), valamint nedves kémai eljárás (fémszol előállítás, *Controlled Colloidal Synthesis* – CCS), segítségével előállított modell- és hordozós, elsősorban aranykatalizátorok tulajdonságait mutatjuk be. Az ESL által sikerült 25 ± 0,5 nm átmérőjű részecskéket előállítani szabályos kétdimenziós elrendeződésben egyforma részecskék közötti távolságokkal (50 ± 2nm) és egyforma magassággal (20 ± 0,5nm). A részecskék szűk mérettartományának és a hosszú távú rendeződésének (cm^2) köszönhetően az ESL által készült rendszermodell katalizátorként használható. A PLD által készített részecskék mérete 2-50 nm határok között változik a párologtatásnál használt nyomástól függően. Szol módszerrel stabilis, néhány nanométer átmérőjű palládiumrészecskék állíthatók elő. A nanorészecskék szerkezetének, morfológiájának tanulmányozása transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), atomi erő mikroszkópia (AFM), ultraibolya fotoelektron spektroszkópia (UPS) segítségével történt.

Bevezetés

Az anyagi részecskék bizonyos határon túli (1–10 nm tartományban) méretcsökkentése döntően befolyásolja a részecskék morfológiáját és elektronszerkezetét, ez viszont döntő mértékben befolyásolja a makroszkopikus tulajdonságokat. A méretcsökkentésnek nemcsak a kémiai és katalitikus tulajdonságok megváltoztatására van hatása, hanem a komplex funkcionális tulajdonságok megteremtését is befolyásolja, melyekről már készült összefoglalás (Gyulai, 2001).

A nanorészecskék előnyei – mint azt részben már említettük is – kis méretükből következik: a morfológiából adódóan a felület/térfogat aránya jelentősen megnövekszik, következésképpen növekszik az élek, sarkok és hajlatok száma. Ez a felületi feleslegenergia megváltozásához, nevezetesen a felületi atomok koordinációjának csökkenésével, a szabad vegyértékek számának növekedéséhez vezet, és így a nanorészecskék reakcióképessége is megváltozik. A rendszer azonban metastabilis, viszonylag könnyen átrendeződik, és a hordozó felületén vándorol, így a részecskék összenövése, ezáltal méretnövekedése következhet be. Éppen ezért igen fontos a részecskék stabilitásának fenntartása és az átrendeződés megakadályozása.

A méretcsökkenés másik eredménye az elektronszerkezet megváltozása. A Fermi-nívó eltolódik a tömbi anyagon mérthez ké-

pest, és az állapotsűrűség (local density of states – LDOS) is megváltozik. Ez viszont a nanorészecske és a szubsztrátum, vagy a reaktáns közötti kötés erősödésével vagy gyengülésével jár együtt. A kötéserősség változása viszont lehetőséget ad másfajta kötések felbomlására illetve képződésére, így a kémiai szelektivitás befolyásolására adott katalitikus reakcióban.

Jól ismert tény, hogy az átmeneti fémek felületi szerkezete befolyásolja, sőt egyes esetekben döntően meg is határozza a reakciók sebességét és szelektivitását. Számos esetben az atomi lépcsők és hajlatok koncentrációja határozza meg az egyes elemi reakciólépések viszonyát, ami az átalakulási sebesség és a szelektivitás megváltozásához vezet. A különböző felületi helyek eltérő aktivitásából következően a különböző orientációjú egykristály-felületen lejátszódó reakcióutakat a felületi helyek eltérő aktivitása szabja meg.

A katalizátorok viselkedését tekintve az egykristályok ideálisak a felületi szerkezet hatásának tanulmányozására, számos ipari oxidhordozós fém nanorészecskét (átmérőjük 1-100 nm) tartalmazó katalizátor viselkedése azonban így nem tanulmányozható. A részecskeméret megváltoztatása hatással van a katalizátor számos tulajdonságára, mint például a részecskék (i) felületi szerkezete, (ii) eloszlása és (iii) elektron-kölcsönhatása a szubsztrátummal. Hasonló módon kialakulhat a nanorészecske és az (oxid) hordozó között is kölcsönhatás, és ez az eredő katalitikus aktivitást illetve szelektivitást is megváltoztatja (ez nem létezik nagyobb fémrészecskék és a hordozó között). Ezenkívül a hordozón lévő felületi részecskék közötti távolság megváltozása is hatással van a szubsztrátum ún. „túlcsordulási" (spillover) folyamataiban részt vevő felületi alakzatok stabilitására.

Nanorészecskék elõállítása

Az irodalomban számos különféle nanorészecskéket előállító módszer ismeretes. A modellkatalizátorok előállítására az egyik ilyen technika a fémek vákuumban történő párologtatása jól definiált szerkezetű hordozóra monoatomos rétegnél kisebb borítottsággal (Poppa,1984; Somorjai, 1997). Könnyen elérhető, hogy az átlagos részecskeméret-intervallum 1,5 és 30 nm között legyen. A zeolitvázba beépülő részecskék méreteit a pórus- illetve a szuperüregek mérete határozza meg, amelyek az 1-2 nm tartományban esnek (Sachtler, 1993; Guczi, 1997). A 2-5 nm részecskeméret és keskeny méreteloszlás elérésére újszerű eljárást fejlesztettek ki (mikroemulziós technika), amelyben felületaktív anyag, olaj és víz keverékét használják (Touroude, 1992). Azonos részecskeméretű fémszolok szintén alkalmasak hordozós fémkatalizátorok előállítására (Bönnemann, 1994). Ezeknek a módszereknek nagy előnye, hogy képesek szűk méreteloszlással kicsiny méretű részecskéket létrehozni. Hátrányuk viszont az, hogy ezáltal nem lehet egyforma elrendeződést biztosítani a hordozó felületén.

Egyforma elrendeződésű részecskék felületi koncentrációja általában csak pár négyzetmikrométeres területre korlátozódik. Az újabban bevezetett „forgótárcsás" (spin-coating) technika segítségével a katalizátor prekurzorát oldat fázisból viszik fel a szubsztrátumra (Doornkamp, 1995). Az oldat legnagyobb része a korongról eltávozik, de egy vékony réteg a korongon marad, amely megfelelő kezelések után használható egyforma méretű részecskék előállítására. E technikák alkalmazása a kicsiny felület miatt a modellkatalizátorok előállításában igen korlátozott.

Jelen tanulmányunkban nem ismertethetjük részleteiben az eddig használt összes módszert, ezért csak (i) az elektronsugár litográfia (ESL) módszerét (amellyel egyforma méretű fém nanorészecskék szabályos elrendezésben állíthatók elő), (ii) a pulzus lézer párologtatás (PLD) módszerét, valamint (iii) a kolloid módszert írjuk le. A cél mind-

három esetben 1-10 nm átmérőjű részecskék kontrollált előállítása. Továbbá be kívánjuk mutatni a modellkatalizátor különböző technikákkal történő jellemzését, valamint a rajtuk lejátszódó katalitikus reakciókat.

A fentiekben közölt részecske-előállítási módszerek biztosítják ugyan a fent megjelölt célok némelyikét, egyetlen technika sem képes azonban létrehozni egyforma méretű részecskékből álló szabályos kétdimenziós részecskehálót. A hordozós modellkatalizátornak: (1) meglehetősen nagy fémfelülettel ($1mm^2$) kell rendelkeznie ahhoz, hogy mérhető mennyiségű reakciótermék keletkezzék, (2) 1-10 nm közötti átmérőjű részecskékből kell állnia és (3) a fém/hordozó megfelelő kombinációjára kell figyelemmel lenni. Az ESL egyforma méretű nanorészecskéket szabályos kétdimenziós rácsszerű eloszlásban hoz létre nagy felületen (cm^2). A PLD is nagymértékben független a kívánt anyagtól, és új eljárás a nanorészecskék készítésére.

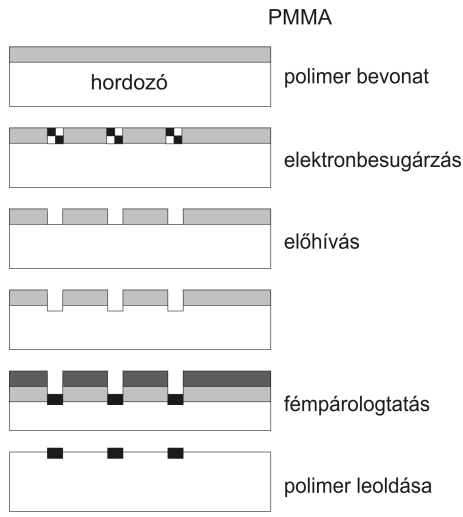
Elektronsugár litográfiával (ESL) előállított nanorészecskék

Annak érdekében, hogy megvizsgálhassuk a részecskeméret és a részecskék közti távolság hatását katalitikus reakciókban, modellrendszert kell használni, amelyben elemi követelmény az egyforma méretű részecskék előállítása, a részecskék közötti egyforma távolságokkal. Ilyen célra alkalmas az elektronsugár litográfia. Az ESL módszert kiterjedten használják a 100 nm alatti méretű, szabályos elrendezésű részecskék előállítására (Jacobs, 1996), és fő előnye más litográfiás technikákkal szemben (röntgen vagy ultraibolya gerjesztés) (1) a nagy térbeli felbontás, (2) a fókusz széles területen való mozgatása és (3) elfogadható sugárnyalábelőállító lehetősége (nincs szükség szinkroton forrásra). A modern ESL rendszer néhány nanométer vastagságú, 10 nm átmérőjű részecskék előállítását teszi lehetővé. Az ESL eljárás fázisainak vázlata az ***1. ábrán*** látható.

Az eljárás első lépésében elektronérzékeny polimert (például polimetil-metakrilátot, PMMA) ***spin-coat*** eljárással felrétegeznek a hordozóra. Azután számítógép által tervezett mintázat kerül a polimer rétegbe, amit pontosan irányított elektonsugár hoz létre. Így az elektronbecsapódás helyein a polimerréteg roncsolódik, és könnyen kioldható. A sérült polimer helyek kioldása után fémbevonatot párologtatnak az így módosított polimer rétegre, végezetül a maradék, nem sérült polimer réteget is leoldják a felületről (lift-off). A korábban roncsolt polimer helyeken a fémrészecskék szabályos elrendezésben maradnak vissza.

Nanorészecskék készítése lézer abláció (PLD) módszerével

Az Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetben az Izotóp- és Felületkémiai Intézettel közösen fém-nanorészecskék előállítására impulzus lézeres párologtatást (PLD), vagy más néven lézer ablációt alkalmaztak (Pászti et al., 1997a). A PLD technikában a fém célanyag felületét lézerrel bombázzák. 30 ns



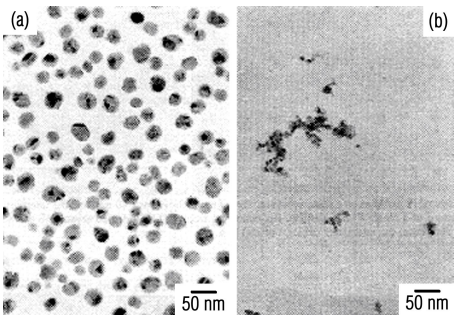
1. ábra • Elektronsugár litográfia vázlatos elrendezése

időtartamú 2 J energiájú impulzus Nd-üveg lézerből származó impulzust használnak. A 30 ns időtartam alatt a fém felületi rétege energiát abszorbeál, megolvad a felületi fémréteg, majd plazma keletkezik, felrobban, és a megolvadt fémrészecskék a szubsztrátum felületére párolognak. Párologtatás alatt a térben uralkodó nyomás $3x10^{7}$ mbar. A keletkezett fém részecskéiből álló vékony réteg vastagságát kvarc kristály oszcillátorral mérték. A bombázott fém felületi hőmérséklete a lézersugárzás, a termikus diffúzió és a célanyag függvénye. Megfelelő beállítással sikerült nanorészecskéket felvinni a célponttal szemben elhelyezett hordozóra, például SiO_2/Si(100) egykristályra.

A PLD folyamat során előállított fémrészecskék méretét a párologtató kamrában uralkodó nyomás jelentősen befolyásolja. Például réz nanorészecskék mérete Si(100) egykristályon vákuumban párologtatva 40 nm, míg 1 mbar nyomású argont tartalmazó térben 5nm, amint ezt a *2. ábra* mutatja.

A vákuumban kialakult fémfilmből azonban szintén fém nanorészecskék állíthatók elő, ha a kialakult réteget 0,5 és 1,5 keV energiájú Ar^+ ionokkal bombázzák (Pászti et al., 1997b).

A nanorészecskék kiemelkedő katalitikus aktivitása az arany nanorészecskék esetében



2. ábra • PLD technikával készült rézfilmek TEM képe. (a) vákuumban párolt, (b) 1 mbar Ar atmoszférában párolt

a legszembetűnőbb. Jól ismert a tömbi arany (például aranyékszerek, gyűrűk, stb), ellenállóképessége mindenfajta korrózióval szemben, ami igen kicsiny reakcióképességre mutat. Jelentős katalitikus aktivitás tapasztalható ugyanakkor a 3-4 nm átmérőjű aranyrészecskéken, különösen akkor, ha ezek például TiO_2, Fe_2O_3, Co_3O_4, stb. oxidhordozón vannak elhelyezve (Haruta, 1997). Japánban például „szagtalanító"-ként használják ezeket, mivel már szobahőmérsékleten is jól működnek. Az arany nanorészecske továbbá számos más reakciót is katalizál, mint például a NO redukcióját, a CO_2 hidrogénezését, a metanol katalitikus bomlását. Számos egyéb kísérlet szerint ez a hatás a 3-4 nm átmérőjű arany nanorészecskék jelenlétének és az arany/oxid hordozó kölcsönhatásnak tudható be.

Kétségtelenül a jövő technológiáját vetíti elénk az arany nanorészecskék alkalmazása. Megemlítendő például a víz-gáz reakció (az a tüzelőanyag-celláknál játszik szerepet), ami az Au/Fe_2O_3 katalizátoron a szénmonoxidot távolítja el a hidrogéngázból, mint a tüzelőanyag-cella egyik komponenséből. A reakció kisebb hőmérsékleten gazdaságosabban történik, mint a ma ismert katalizátorokon. Hasonlóan, az arany nanorészecske hatékony katalizátora nyomnyi szénmonoxid eltávolításának hidrogéngázból. Ez azért fontos, mert a szénmonoxid erősen mérgezi a tüzelőanyag-cellában elhelyezett, a hidrogén-oxigén reakcióra szolgáló katalizátort. Ezenkívül az aranykatalizátor a dízel motorok utóégető katalizátoraként is használható, amelyet igen kiterjedten kutatnak (Thompson, 2003; Cameron, et al., 2003).

Mi a titka az arany nanorészecskék kiváló katalitikus aktivitásának? Az arany nanorészecskék méretét tekintve felmerül a kérdés, hogy ilyen arany nanorészecskékben a fémes vagy az ionos állapot-e az aktív. Elektronspektroszkópiai vizsgálatok egyértelműen azt mutatják, a vegyértéksáv elektronszerkezete megváltozik, ha a részecskék

mérete a kritikus 3-4 nm átmérőre csökken. Így a néhány száz atomból álló részecske elektronszerkezete a fémes és az ionos állapot között van, és ez elősegíti az arany és hordozó közötti kölcsönhatás domináló tényezővé válását.

Összefoglalva megállapítható, hogy az arany nanorészecskék kimagasló katalitikus aktivitását (i) a fémes állapotú aranyrészecskék (3-4 nm átmérőjű) és (ii) az amorf vasoxid mint hordozó együttes jelenléte hozza létre. Így az aranyrészecske közvetlen környezetében fém/hordozó határfelület alakulhat ki, amelyen az oxigén hibahelyek elősegíthetik például az oxigén aktiválását.

Nanorészecskék előállítása kolloidkémiai módszerekkel

A fizikai módszerek mellett egyre nagyobb tért hódítanak a nanorészecskék nedves kémiai módszerekkel történő előállítási módszerei. A bevezetőben már említett zeolit üregeibe zárt nanorészecskék, a szol/gél technika és az inverz micellás előállítás a részecske méreteloszlását lényegében nem szabályozza.

A ma ismert leghatékonyabb módszer az ún. „kontrollált kolloid szintézis", amelyben a gócképződés/részecskenövekedés sebességeinek aránya szabályozható. A módszer elve a következő: aerosil hordozó (SiO_2) felületén etanol/toluol elegyből kb. 1 nm-es vastag adszorpciós határfelületi réteget hoznak létre, amelyben a Pd^{2+}-ionokat az etanol redukálja, ezáltal megindul a gócképződés a mellékelt séma szerint.

A fém gócok *in situ* képződnek a hordozó felületén, és stabilizálódnak. A részecske növekedése a határfelületi rétegben a prekurzor ionok redukciójával történik. Lassú redukció esetén a kezdeti gócképződés homogén eloszlást mutat, és a gócok egyenletesen növekednek további gócképződés nélkül (Beck et al., 2000). A részecske méretét a gócképződés és a részecske-növekedés sebességarányainak változtatása határozza meg.

A másik igen jól használható módszer a fém-szolok előállítása és felvitele a hordozóra. Ez esetben azonban a fém-szolok nem stabilisak, könnyen koagulálnak, így stabilizátor használata szükséges. A stabilizátorokat a szol adszorpciója után a felületről eltávolítják.

Megállapítható tehát, hogy a fém-prekurzorok oldatban lejátszódó redukciója nanoméretű részecskéket eredményez, melyek megfelelő stabilizálási körülmények mellett megőrzik eredeti méretüket. A szolképződés során az oldatban jelen lévő polielektrolit szolgál stabilizátorként, mivel a fémrészecskéket körülvéve, megakadályozza azok aggregációját. A szolban lévő fémrészecskék szilárd felületen való megkötésével hordozós fémkatalizátor nyerhető.

A méretszabályozás egyszerre több, feltehetőleg egy irányba ható tényező változtatásával érhető el (például polimer és etanol mennyiségének növelésével). A hordozós mintákról készült TEM-felvételek szerint a fémrészecskék a hozzájuk hasonló méretű egyedi SiO_2 részecskék háromdimenziós hálózatrendszerében, egyenletes eloszlásban találhatóak.

A katalizátorokban lévő fémrészecskék nulla oxidációs állapotban vannak (vagy parciálisan kissé pozitívan töltöttek az etanol/toluol elegyben készült mintákban), és nagyobb hőmérsékletű kezelések hatására nem szinterelődtek. Összehasonlítva a különféle módon előállított katalizátorok felülete oxidálás/redukálás után sem változik számottevően (az oxidációs/redukciós kezelés utáni CO-kemiszorpció csak csekély mértékű felületnövekedést jelzett).

A katalizátorok kiemelkedő aktivitást mutatnak a benzol hidrogénezési reakciójában. Kísérleteink igazolták, hogy az aktivitás megnövekedéséhez elégséges bizonyos mértékű felületi oxidáció, a kis hőmérsékletű redukciót megelőzően teljes tömbi oxidá-

cióra nincs szükség. Az általunk alkalmazott 80 °C-os hidrogénes kezelés után az előzetes oxidáció miatt sok hibahellyel rendelkező, rendezetlen Pd felület megmarad.

A kalcinálás utáni redukció hőmérsékletének változtatásával reverzibilisen változó reakciósebességi értékeket kaptunk. A nagyobb redukciós hőmérsékleten a Pd felület egyenetlensége kezd „kisimulni", ami az aktivitás csökkenését eredményezi. Az ismételt oxidáció után az alacsony hőmérsékletű redukció révén létrejött rendezetlen Pd felület a hidrogén aktív formáját feltehetőleg ismét hatékonyabban hozza létre, és a benzol hidrogénezés reakciósebességének növekedését eredményezi.

Következtetések és összefoglalás

Mi tehát a következménye a fém részecskék méretcsökkentésének a katalízisre illetve a katalitikus aktivitásra ? A katalizátor felületén a reagáló anyagok nemcsak maguk alakulnak át, hanem e kémiai reakciók a felület morfológiáját, összetételét, elektronos tulajdonságait, stb. is megváltoztatják. E változások legérzékenyebben a kis fémrészecskéket érintik, következésképpen a jelen nagy kihívása a néhány nanométer méretű részecskék szerkezete és reakcióképessége közötti összefüggések vizsgálata, azok stabilitásának, átrendeződésének és felületük, valamint a reagáló molekulák közötti kölcsönhatás következtében kialakuló ún. katalitikus rendszer sorsának nyomon követése. A kis részecskéket jellemzi nanométeres dimenziójuk, atomjaiknak rövid távú rendezettsége, és a részecskék kis mérete következtében megnövekedett számú sarkok, élek, hajlatok nagyobb reakcióképessége. E változások legérzékenyebben például a fém vegyértéksáv szerkezetének vizsgálatával észlelhetők, tehát ennek ismerete a megváltozott felületi szerkezetről nyújt felvilágosítást.

Az ismertetett módszerek a kutatók kezébe olyan eszközt adnak, amely segíti a kis részecskékből álló modellkatalizátorok előállítását, tulajdonságaik megismerését és ezáltal, az optimálisan működő katalitikus rendszerek tervezését.

A nanorészecskékkel borított oxidhordozós fémkatalizátorok működésének jobb megértésére olyan modellkatalizátorokat készítünk, amelyeknek részecskeméretét és részecskeközti távolságát is szabályozni lehet. Az ESL lehetővé teszi, hogy nagy területen (cm^2 nagyságrend) néhány nanométer átmérőjű fémrészecskéket rendezetten alakítsunk ki. A technika lehetőséget nyújt arra is, hogy szisztematikusan változtassuk a részecske méretét és a részecskék közti távolságot. Az ESL ezért ideálisan alkalmas modellkatalizátorok készítésére, és jól használható a részecskeméret, a részecskék közti távolság és az aktivitásban és szelektivitásban szerepet játszó katalizátor összetétel-hatásának vizsgálatára.

A PLD olyan új technika, amelynek segítségével 1 nm-es és ennél nagyobb átmérőjű fém nanorészecskéket állíthatunk elő, de nem teljesen szabályos elrendezésben. A PLD használatával rendezett modellkatalizátorokat tudunk előállítani újszerű lehetőségekkel. Mind a két előállítási eljárás független az anyagtól, azaz a fémtől és a hordozótól, így tehát a fémek a hordozókkal jól kombinálhatók.

Az eddigi vizsgálatok két igen fontos megállapítást tesznek lehetővé. Az egyik az, hogy ma már a nanorészecskék szabályozott módon, mind fizikai, mind pedig kémiai módszerekkel előállíthatók. A másik fontos megállapítás az, hogy – ellentétben korábbi feltételezésekkel – e részecskék hiperaktivitásuk mellett sem veszítik el stabilitásukat. A jövőben tovább kell vizsgálni a nanoklaszter rendszerek termikus és kémiai stabilitását a részecskeméret és az oxidhordozó természetének függvényében. Ezenkívül alkalmas reakciókat kell keresnünk, ahol a szelektivitás döntő szerepet játszik. Példaként megemlíthető a gyógyszeripar, ahol királis molekulák

gyógyszerkémiai szempontból aktív módosulatának szelektív előállítására van mód. A jövő új irányzata a tüzelőanyag-cella. Az ún. metanol közvetlen oxidációjában nanoméretű platina mint elektród igen nagy hatékonysággal dolgozik. Nanoméretű arany részecskék illetve ezek módosított változatai hatékony katalizátorai a tüzelőanyagcellában használt hidrogén szénmonoxidtól történő megtisztításának. A hidrogén-oxigén égetés katalizátora ugyanis igen könnyen szennyezhető szénmonoxiddal. Számos egyéb reakcióban a nanorészecskék ugyancsak ígéretes eredményre vezethetnek.

A szerző köszönetét fejezi ki Pető Gábornak és Pászti Zoltánnak és az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének, ahol a lézer ablációs kísérletek készültek. Az elektron litográfiai kísérletek a Berkeley Egyetem Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratóriumában (Berkeley, Calfornia, USA) készültek. Ugyancsak köszönettel tartozom Dr. Beck Andreának, Dr. Horváth Anitának, Frey Krisztinának és Dr. Sárkány Antalnak (MTA Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézet) kísérleti eredményeikért és a kísérleti anyagok értékelésében való közreműködéséért.

Kulcsszavak: *fém nanorészecskék, elõállításuk, alkalmazásuk katalitikus reakciókban*

IRODALOM

Beck Andrea – Horváth A. – Szűcs Z. – Schay Z. – Horváth E. – Zsoldos Z. – Dékány I. – Guczi L. (2000): Pd Nanoparticles Prepared by "Controlled Colloidal Synthesis" in Solid/Liquid Interfacial Layer on Silica I. Particle Size Regulation by Reduction Time. Catalysis Letters. **65**, 33-42.

Bönnemann, Helmut – Brijoux, W. – Brinkmann, R. – Fretzen, R. – Joussen, T. – Köppler, R. – Korall, B. – Neiteler, P. – Richter, J. (1994): Preparation, Characterization, and Application of Fine Metal Particles and Metal Colloids Using Hydrotiorganoborates. Journal of Molecular Catalysis. **86**, 129-177

Cameron, D. – Holiday, R. – Thompson, David (2003): Gold's Future Role in Fuel Cell Systems. Journal of Power Sources. megjelenés alatt

Doornkamp, C. – Laszlo, C. – Wieldraaijer, W. – Kuipers, E. W. J. (1995): Exploration of the Deposition of Submicrometer Particles by Spin-Coating. Journal of Materials Research. **10**, 411-424.

Guczi László – Sundararajan, R. – Koppány Zs. – Zsoldos, Z. – Schay, Z. –Mizukami F. – Niwa, S. (1997): Structure and Characterization of Supported Ruthenium-Cobalt Bimetallic Catalysts. Journal of Catalysis. **167**, 482-494.

Gyulai József (2001): A nanotudomány helyzete. Magyar Kémikusok Lapja. **56**, 169-173.

Haruta, Masatake (1997): Size- and Support-Dependency in the Catalysis of Gold. Catalysis Today. **36,** 153.

Jacobs, P. W. – Ribero, F. H. – Somorjai G. A. – Wind, S. J. (1996): New Model Catalysts: Uniform Platinum Cluster Arrays Produces by Electron Beam Lithography. Catalysis Letters. **37**, 131-136.

Pászti Zoltán – Horváth Z. E. – Pető G. – Karacs A.– Guczi L. (1997b): Pressure Dependent Formation of Small Cu and Ag Particles During Laser Ablation. Applied Surface Science, **109/110,** 67-73.

Pászti Zoltán – Pető G. – Horváth Z. E. – Karacs A.– Guczi L. (1997a): Formation and Valence Band Density of States of Nanospherical Cu Nanoparticles Deposited on Si(100) Substrate. Journal of Physical Chemistry B. **101.** 2109-2115.

Poppa Helmut (1984): Model Studies in Catalysis with UHV-Deposited Metal Particles and Clusters. Vacuum. **34**, 1081-1095.

Sachtler, Wolfgang M. H. – Zhang, Z. (1993)*:* Advances in Catalysis. **39**, 129.

Somorjai Gábor A. et al., (1997): Surface Science Approach to Modeling Supported Catalysts, Catalysis Reviews - Science and Engineering. **39**, 77-168.

Thompson David T. (2003): Perspective on Industrial and Scientific Aspects of Gold Catalysis. Applied Surface Science. A., **243**, 201-205.

Touroude, Raymonde – Bernhardt, P. – Maire, G. – Kizling, J. – Boutonnet-Kizling, M. – Stenius, P. (1992): in Friberg, Stig E. – Lindman, Björn (eds.): *Organized Solutions Surfactants in Science and Technology*. Marcel Dekker Inc., New York

NANOSZERKEZETÛ ANYAGOK ÉS A KOLLOID ÁLLAPOT

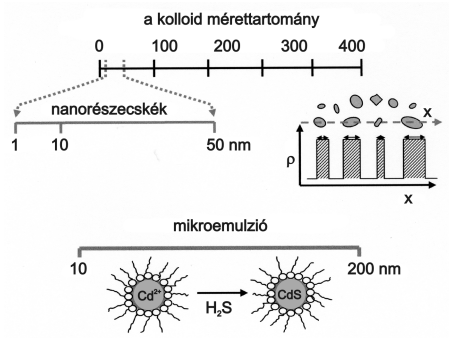
Dékány Imre
az MTA levelező tagja, Szegedi Tudományegyetem Kolloidkémiai Tanszék
MTA Nanoszerkezetű Anyagok Kutatócsoportja – i.dekany@chem.u-szeged.hu

Bevezetés

A kolloidok a finoman eloszlatott anyag egységei, amelyek dimenziói a nanométertől a mikrométer tartományig terjednek, és nagy felület/térfogat aránnyal rendelkeznek. Az elmúlt években megerősödtek azok a tendenciák, amelyek olyan struktúrák előállítását szorgalmazták, amelyeknek keletkezését és növekedését ellenőrizni tudjuk. Ehhez nyújt segítséget a fizika, amely a makroszkopikus szerkezetektől a miniatűr egységekig, minden dimenzió előállítását lehetővé teszi. A 90-es években azonban a nanotudományok kerültek előtérbe, amelyek olyan speciális tudományterületet jelentenek, amelyek a technológiai fejlődés új szakaszát követelik meg. Ez a fejlődés még tíz évvel ezelőtt sem volt előrelátható. A kolloidok és a határfelületek tudománya elsőrendűen multidiszciplináris terület, mivel a kémia különböző területein való megjelenésük mellett a fizika és a biológia szakterületét is érintik. Ilyenek a biomimetikus folyamatok, az önrendeződő szervezetek, a szenzorokkal működő új méréstechnikák, amelyek felhasználása eddig ismeretlen volt, a mesterséges sejtek, a DNS-chipek konstruálása, stb. Ezeket gyakorlatilag a gyógyszerészetben, az orvostudományban, az információs technológiában, a katalízisben, a modern kozmetikában, a korszerű lakk és festék- és textiliparban, az új építőanyag és szerkezeti anyag kompozitok gyártásában és környezetbarát technológiákban hasznosítják.

A nanoszerkezetű anyagokat a Wolfgang Ostwald-féle diszperz rendszer elmélet szerint a kolloid mérettartomány alsó határán találhatjuk. Az európai kolloidkémia egyik alapítója, Wolfgang Ostwald az 1914-ben megjelent ***Az elhanyagolt dimenziók világa*** című könyvében hangsúlyozta, hogy a molekuláris méretek és a mikroszkopikusan észlelhető rendszerek között léteznek olyan részecskehalmazok, amelyek a fény hullámhosszával nagyságrendben azonos méretűek. A Richard Zsigmondy által felfedezett ultramikroszkóppal már be is bizonyították (például a kolloid arany- és ezüstszolok – nanorészecskék – vizsgálatakor) ***a szubmikroszkópos diszkontinuitások***, vagyis a kolloid részecskék létezését. Az Ostwald-féle definíció szerint a kolloid mérettartomány 1-500 nm között definiálható, de senki sem gondolhatott a húszas években arra, hogy ezen mérettartomány alsó határán az anyag eddig nem ismert, új tulajdonságokat mutathat ***(1. ábra)***. Mégis mintegy hat évtized telt el ismét, amikor a korszerű fizikai (ultranagy vákuumtechnikai) vizsgálati módszerek lehetővé tették a néhány nanométer átmérőjű részecskék tanulmányozását, amelyekről kiderült, hogy új fizikai (például félvezető, optikai, mágneses, stb.) és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek (Yamanaka, 1987; Vinodgopal, 1995). A következőkben vizsgálatainkat elsősorban az 1-50 nm mérettartományban található nanorészecskékre

terjesztjük ki, mivel ezen mérettartományban jelentős kölcsönhatások működnek a határfelületeken, és ezen határrétegek tulajdonságait ismerve juthatunk el a nanoszerkezetű anyagok előállításához és stabilizálásához (Kotov, 1996; Kotov, 1997). A diszperziós kolloidok előállításánál, a kinetikai állandóság vizsgálatánál nagyon lényeges a stabilizáló határrétegek szerkezete és kiterjedése. Az előállítási lehetőségeket tekintve technikailag az egyik legegyszerűbb rendszer a szilárd-folyadék, illetve a folyadék-folyadék határfelületet tartalmazó kolloid diszperzió. Mivel az adszorpciós réteg kiterjedése néhány nanométer, felvetődik a kérdés, hogy létrehozhatunk-e nanoszerkezetű anyagokat ezen erőtérben, kihasználva azt, hogy az adszorpció révén a legkülönbözőbb anyagok (ionok, molekulák, makromolekulák, tenzidek, stb.) feldúsulnak a felületen. Mint a következőkben látni fogjuk, a határfelületeken kiváló lehetőség nyílik az adszorpció miatt az ún. önrendeződő (vagy önszerveződő) struktúrák (ún. kvázi kétdimenziós szerkezetek) szabályozott létrehozására. Természetesen a vizsgált részecskék felületén lévő adszorpciós rétegben is lehetőség van a nanorészecskék előállítására, így a klasszikus értelemben vett diszperz rendszerekben (szolokban és szuszpenziókban) *a szilárd-folyadék határfelületi rétegekben* is mint „nanoreaktorokban" előállíthatók néhány nanométer átmérőjű részecskék.



1. ábra • A kolloid mérettartomány és a nanorészecskék viszonya. Az ábrán a szubmikroszkópos diszkontinuitásokat a sűrűség (ρ) vs. x függvényen mutatjuk be.

Nanorészecskék előállíthatók folyadék-folyadék határfelületeken is. Ez a mérettartomány a kolloid rendszerek esetében az ún. mikroemulziók 100-200 nm-es tartománya. A mikroemulziók termodinamikailag stabilis rendszerek, amelyekben az egymással nem elegyedő két folyadékfázis tenzidek segítségével egymásban cseppek formájában diszpergálódott. A mikroemulzió cseppek tehát mint nanoreaktorok adnak teret a megfelelő átmérőjű részecskék szintézisének. A cseppek átmérője a tenzid-víz aránnyal szinte tetszőlegesen szabályozható. Ezért az előállítani kívánt nanorészecskék mérete a mikroemulzió összetételnek megfelelően változtatható (B. Nagy, 1983).

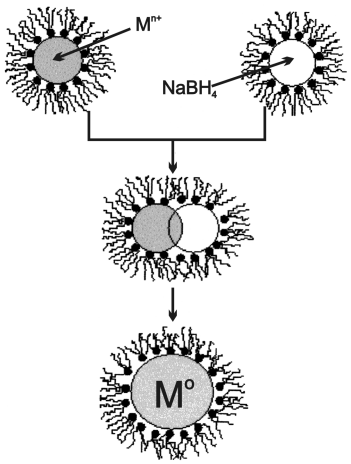
Nanorészecskék szintézise micellákban, mikroemulziókban és folyadékkristályokban

Micellák és mikroemulziók belső terében is előállíthatók a szabályozott és kívánt méretű kolloid részecskék (B. Nagy, 1983). Ebből a célból először egy szerves közegű (például toluol) mikroemulzió belső vizes cseppjeiben feloldjuk a nanorészecske képződéséhez szükséges egyik komponenst, majd ugyanazon összetételű mikroemulzió másik részében a másik reakciópartnert. A két mikroemulzió keverése után megkapjuk a cseppekben létrejövő terméket, a nanorészecskéket, amelyeket a cseppet stabilizáló tenzid molekulák szintén megvédenek az összetapadástól, vagyis szubmikroszkópos részecskéket kapunk. *(2. ábra)*

A cseppek, illetve a részecskék mérete a tenzid/víz arány változtatásával szisztematikusan szabályozható.

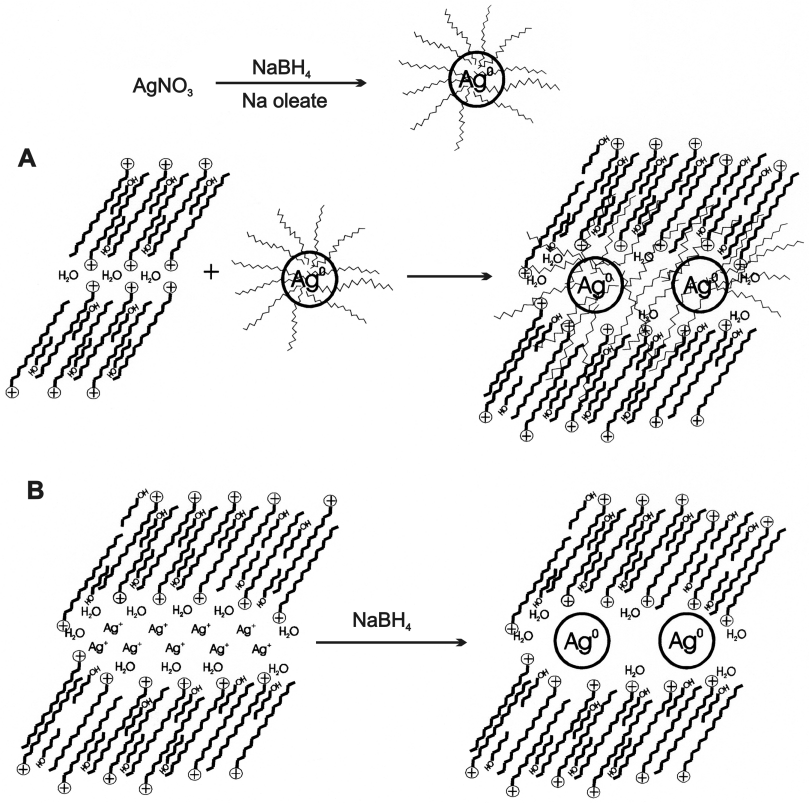
Tenzidek vizes oldatában a töménység növelésével folyadékkristályos szerkezetű

2. ábra • Nanorészecskék szintézise mikroemulzió cseppekben. Az ábrán bemutatott M^{n+} fémionokat Na-borohidriddel fém nanorészecskékké redukálhatjuk szobahőmérsékleten.



szmektikus rétegek keletkeznek, melyek lamellái között például ezüst nanorészecskék stabilizálhatók, illetve állíthatók elő. A *3. A ábrán* az ezüst nanorészecskéket Na-oleáttal hidrofobizáljuk, majd a hidrofobizált ezüst beépül a folyadékkristály lamellák közé. A *3. B ábrán* a folyadékkristályos rendszerben ezüst-nitrát formájába visszük be a prekurzor ionokat, majd a szobahőmérsékleten történő redukcióval a tenzid lamellák stabilizálják a fém nanorészecskéket.

3. ábra • Ezüst nanorészecskék előállítása folyadékkristályos rendszerekben. A: hexadecil-trimetil-ammónium-bromid/n-pentanol/víz folyadékkristályos rendszerben stabilizált és Na-oleáttal hidrofobizált Ag nanorészecskék interkalációja. B: a folyadékkristály interlamelláris terében víz nanorétegben lévő ezüstionok redukciója Ag nanorészecskék előállítása céljából.

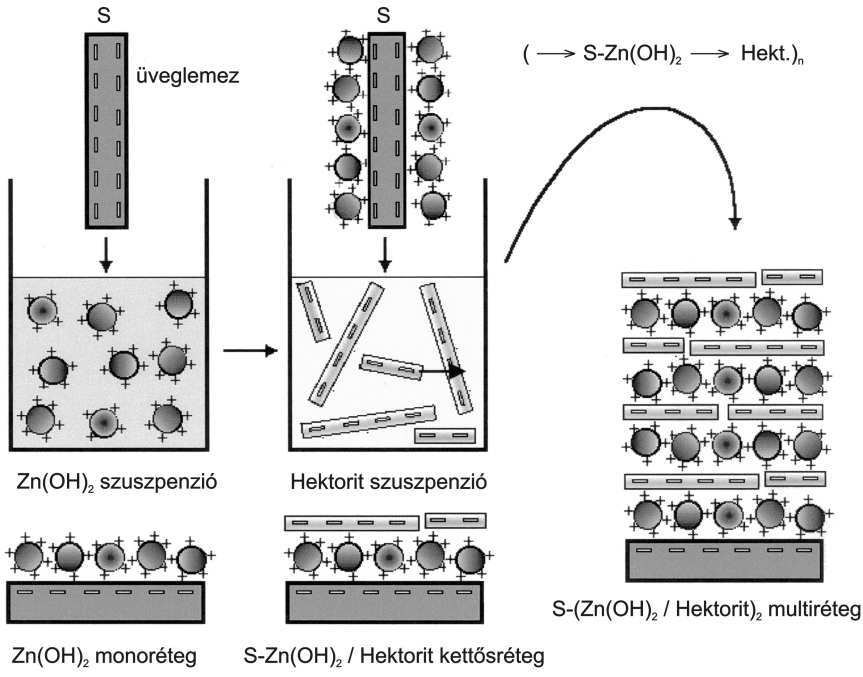


Ultravékony nanofilmek és önszervezõdõ kolloid rendszerek

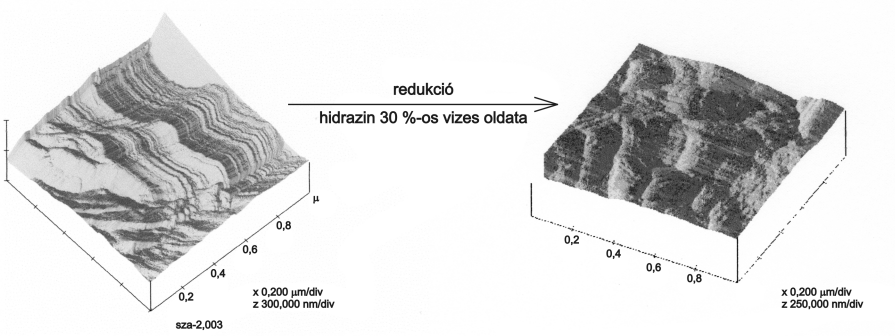
Az adszorpciós jelenségek tanulmányozása és a határfelületi rétegek szerkezetének, valamint a részecskék közötti kölcsönhatások megismerése lehetőséget ad arra, hogy különböző lamellás szerkezetű anyagokból (például agyagásványokból vagy grafit-oxidból) – melyek vastagsága kb. 1 nm – ultravékony filmeket állítsunk elő. A lamellák az adszorpciós erők hatása miatt önrendeződésre képesek, és a rétegszámtól függően 5-100 nm vastagságú rétegek állíthatók elő sík felületen (Kotov, 1996). A *4. ábrán* negatív töltésű üvegfelületre adszorbeáltatunk pozitív felületi töltéssel rendelkező fémhidroxid nanorészecskéket, majd szárítás után ezeket negatív felületi töltéssel rendelkező rétegszilikát (hektorit) szuszpenzióba merítjük. Ezáltal a felületen mintegy 5 nm vastagságú kettősréteg képződik. A film stabilitását a különböző rétegekben lévő ellentétes töltések biztosítják.

A folyamat ciklikus ismétlésével 30–50 réteg vihető fel az üveg felületre, amelynek réteges orientációja röntgendiffrakciós kísérlettel igazolható. Kalcinálás után cink-oxid nanorészecskék keletkeznek a stabilizáló szilikátlamellák között, amelyek mint kiváló fotokatalizátorok alkalmazhatók. Az ón-dioxidról közismert, hogy kiváló félvezető és szenzor alapanyag. Így például szol-gél eljárással savas közegben pozitív felületi töltésű ón-hidroxid nanorészecskéket állíthatunk elő, majd a rétegszilikátokkal való stabilizálás utáni kalcinálással ón-dioxid/rétegszilikát nanofilmek készíthetők.

Nanofilmek preparálásához nemcsak kolloid részecskéket, hanem makromolekulás kolloidokat is használhatunk. Előnyösen alkalmazhatók a töltéssel rendelkező poli-



4. ábra • Önszerveződő cink-hidroxid/hektorit ultravékony nanofilmek előállítása bemerítéses technikával.



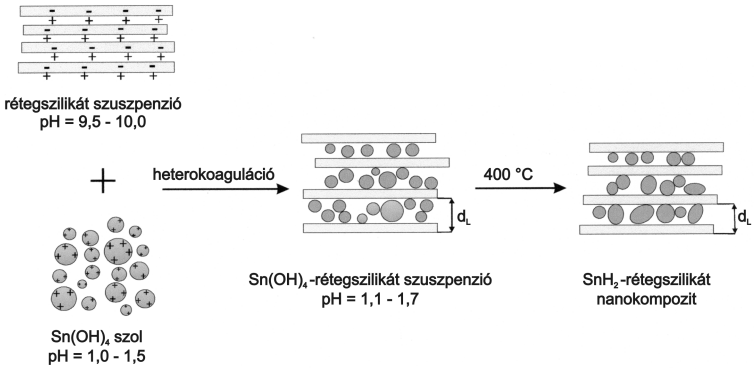
5. ábra • Polimerrel interkalált grafit-oxid és a redukált grafit nanofilm AFM képe.

merek vagy polielektrolitok. Így például kationos polimerekkel grafit-oxidból polimer/grafit-oxid ultravékony nanofilmeket készíthetünk, amelyeket szobahőmérsékleten hidrazinos oldatban részlegesen vagy teljesen grafittá redukálhatunk. Ez a nanotechnológiai eljárás lehetővé teszi, hogy 20-50 nm vastagságú, rendezett grafit filmeket állítsunk elő, amelyek vezetőképessége a redukció mértékével szabályozható. Ezen grafit nanofilm felületi szerkezetére vonatkozó AFM képet az *5. ábrán* mutatjuk be.

A réteges szerkezetű szilikát ásványok kiválóan alkalmasak arra, hogy felületükön és interlamelláris terükben néhány nanométer átmérőjű részecskéket állítsunk elő kolloid szuszpenziókban. Az eljárásokban fontos szerepet töltenek be a stabilizálószerek, amelyek a kialakult nanorészecskéket megóvják az aggregációs folyamatoktól, így igen kicsi (néhány nanométer mérettartományba eső) részecskék előállítása is elérhetővé válik. A természetes agyagásványok (montmorillonit, hektorit, szaponit, stb.) azért alkalmasak erre a célra, mert jól duzzadnak vizes közegben, és így nagy belső felülettel rendelkeznek. A szilikátlemezek negatív töltésűek, és így felületükön töltéskompenzáló kationok (például Na^+, $Ca^{2+,}$ stb.) találhatók, amelyek például nemesfém kationokra cserélhetők (Dékány, 1999; Papp, 2001a; Papp, 2001b**;** Dékány, 1996).

A különböző félvezető és átmeneti fém nanorészecskék előállítására számos olyan módszer ismert, amelyek a részecskék stabilizálásához és a méret szabályzásához asszociációs kolloidokat (micellákat, mikroemulziókat, Langmuir-Blodgett filmeket vagy egyéb önrendeződő rendszereket) használnak fel (Kotov, 1997; Dékány, 1999; Papp, 2001a). Az ismert szintézismódszerek között mind organikus, mind vizes közegben lejátszódó reakciók találhatók. Az eljárásokban fontos szerepet töltenek be a stabilizálószerek, amelyek a kialakult nanorészecskéket megóvják az aggregációs folyamatoktól, így igen kicsi (néhány nanométer méretű) részecskék előállítása is elérhetővé válik. A legtöbb esetben polimereket, alkil-ammónium sókat, tenzideket használnak stabilizálószerként, amelyek segítségével kis részecskeméretű szolokat szintetizálnak.

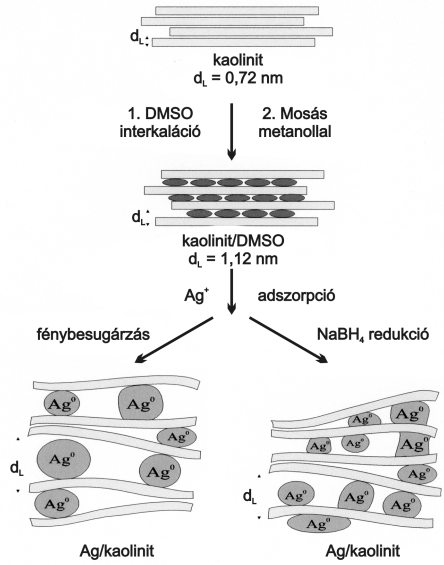
Korábbi munkáinkban mi a szilárd/folyadék határfelületű adszorpciós réteget, mint „nanofázisú reaktort" alkalmaztuk nanokristályos félvezetők (CdS, ZnS, TiO_2) előállítására illetve az agyagásvánnyal való stabilizálására (Papp, 2001b; Dékány, 1996; Szűcs, 2001). Az eljárás lényege az, hogy a folyadékban diszpergált szilárd részecskék felületén lévő rétegben adszorbeáltatjuk a nanokristályos anyag prekurzor ionjait, és a szintézist a megfelelő redukálószer (alkoholok, hidrazin, stb.) bevitelével a felületi rétegben hajtjuk végre.



6. ábra • Fém-hidroxid nanorészecskék előállítása adszorpcióval és hidrolízissel a szilikát lamellák interlamelláris terében mint „nanoreaktorban". A félvezető fémoxid 400-500 °C-on történő kalcinálás után keletkezik a lamellák között.

A prekurzorok oldékonyságát úgy állítjuk be a diszperziós közeg megválasztásával, hogy ebben a prekurzor ionok gyakorlatilag ne oldódjanak. Ha az oldékonyság nem jelentős a folyadékfázisban, akkor a prekurzor ionok preferáltan adszorbeálódnak a szilárd felületen, és a tömbfázisban koncentrációjuk közel zérus lesz. Ezt az eljárást ***kontrollált kolloid szintézisnek*** is tekinthetjük, amely lényegesen különbözik a fémkatalizátorok előállításához ismert impregnálásos technikától. ***A nanofázisú reaktor alkalmazásának lényege éppen az, hogy a diszperziós közegben mint tömbfázisban nem képzõdik részecske***. Különösen jó lehetőséget biztosítanak a fenti eljárásokhoz a réteges szerkezetű szilikátlamellák, mivel a prekurzorok adszorpciója és az azt követő nanorészecske-képződés és -növekedés a lamellák közötti interlamelláris térben sztérikus okok miatt is korlátozott *(6. ábra)*. Ha például negatív töltésű rétegszilikát lamellák között ón-hidroxid nanokolloid szol részecskéket adszorbeáltatunk, ún. heterokoaguláció történik. Vagyis a kolloid diszperz rendszerben önként végbemegy az az önrendeződő folyamat, amelyet az előzőekben a nanofilmek előállításánál bemutattunk. A heterokoaguláció során keletkezett ón-hidroxid/rétegszilikát kompozit kalcinálásával ón-dioxid rétegszilikát nanokompozit fotokatalizátort vagy szenzor alapanyagot állíthatunk elő.

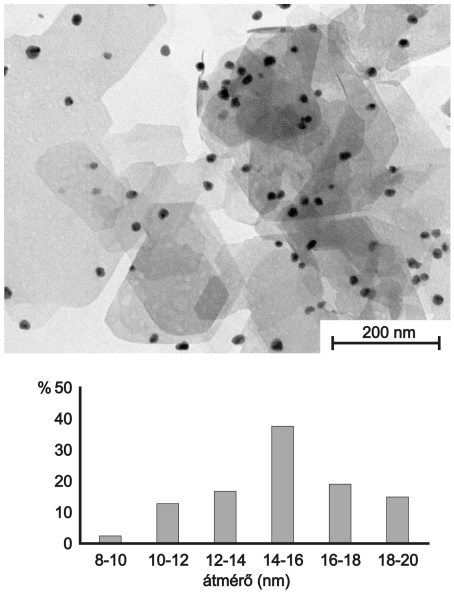
A *7. ábrán* a kaolinit részecskék mint kiváló kerámiai alapanyagok hasznosíthatóságát mutatjuk be nanoszerkezetű fém-kerámia kompozitok előállítása céljából. Így például



7. ábra • A kaolinit lamellák hasítása dimetil-szulfoxiddal (DMSO) és az ezüst interkalációja a kaolinit lamellák között. A redukciót $NaBH_4$ vizes oldatával szobahőmérsékleten illetve vizes szuszpenzióban fény besugárzással valósíthatjuk meg.

ha a kaolinit lamelláit dimetil-szulfoxiddal történő interkalációs reakcióban elemi lamellákra hasítjuk, akkor az interlamelláris térbe fémionok vihetők be. Az ábrán bemutatott ezüst-ionok mind fény hatására, mind szobahőmérsékleten redukálószerek hatására ezüst nanoklaszterekké alakulnak, amelyek beépülnek a lamellák közé. A szerkezetről készített TEM felvételt és a részecskeméret eloszlást a *8. ábrán* láthatjuk. Megállapítható, hogy a lamellák között nagy gyakorisággal (14-16 nm) átmérőjű ezüst nanorészecskék foglalnak helyet.

A Pd-nanorészecskék is előállíthatók rétegszilikátokon, ha a prekurzorokat ioncsere adszorpcióval megkötöttük a felületen. Az adszorpciós izoterma ismeretében számítottuk ki a szükséges prekurzor anyagmennyiségét. A redukálószerként használt etanol mennyiségét az etanol(1)-víz(2) elegyadszorpciós többletizotermája és a nanofázisú reaktor megfelelő összetételének ismeretében számítottuk ki (Dékány, 1996; Szűcs, 2001). Vizes közegben makromolekulás stabilizálással is előállítottunk Pd nanorészecskéket. A szintézishez nemionos polimereket is használtunk. A *9. ábrán* sematikus áttekintést mutatunk be a fém nanorészecskék kolloid módszerekkel történő stabilizálási lehetőségeire. Így a prekurzorokból homogén nukleációval előállíthatunk néhány nanométeres átmérőjű polimerrel stabilizált fém nanorészecskéket. Heterogén nukleációval valamilyen réteges szerkezetű adszorbens felületén, illetve interlamelláris terében szintén előállíthatunk nanorészecske/hordozó kompozitokat. A két módszer kombinációjával viszont rendkívül stabil – az interlamelláris térben polimerrel védett – nemesfém/polimer/rétegszilikát kompozitokat állíthatunk elő.

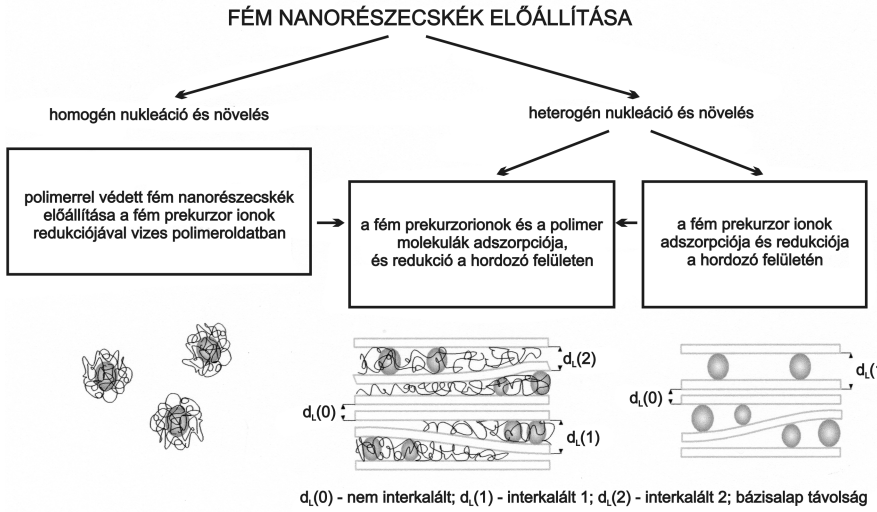


8. ábra • Ag/kaolinit kompozit TEM felvétele és részecskeméret eloszlása.

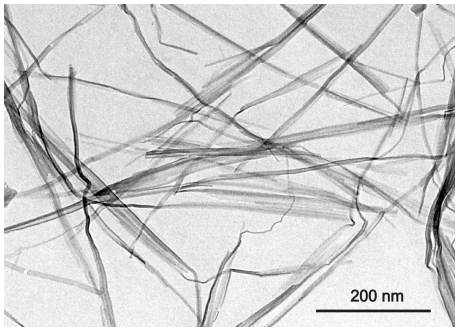
A félvezető nanorészecskék a gyakorlatban jól alkalmazhatók környezetre káros szervesanyagok fotooxidációs lebontására. Az erre a célra előállított TiO_2, ZnO és SnO_2 nanorészecskék kiválóan alkalmasak például montmorillonit hordozókon talaj- és víztisztításra. A fotokatalitikus aktivitás növelhető, ha a látható fény spektrumában abszorbeáló félvezetőkből, például vanádium-pentoxidból a felületre heterokoagulációval felviszünk 0,01-0,1% mennyiséget. Erre vonatkozóan láthatunk a *10. ábrán* egy TEM felvételt, amelyen a vanádium-pentoxid mint nanoszerkezetű kolloid, szálas formában kötődik a felülethez.

Összefoglalás

A nanoszerkezetű anyagok előállítása és határfelületi rétegek tanulmányozása sok tekintetben összefüggő feladat megoldását jelenti. Az adszorpciós réteg szerkezetének ismeretében lehetőség van a rétegben nanorészecskék előállítására és stabilizálására, ha réteges szerkezetű hordozókat alkalmazunk adszorbensként. A félvezető vagy nemesfém nanorészecskéket különböző hordozókon stabilizátorokkal és azok nélkül állítottuk elő



9. ábra • A polimerek és a rétegszilikátok együttes alkalmazása fém nanorészecskék stabilizálása céljából.



10. ábra • Vanádium-pentoxid szol TEM felvétele. Az ábrán jól láthatók a 2-5 nm átmérőjű félvezető nanoszálak.

2-10 nm mérettartományban. A részecskék jelenlétét TEM és XRD módszerekkel igazoltuk. A nanorészecskékkel borított felületi rétegek szerkezetét AFM technikával jellemeztük. A félvezető fémoxid nanorészecskéket rétegszilikátokba is beépítettük, és ezen nanokompozitok kiváló fotokatalitikus tulajdonságokat mutatnak, amelyek a napenergia felhasználását teszik lehetővé környezetre káros szerves anyagok lebontása céljából.

Köszönetet mondok munkatársaimnak: Papp Szilviának, Patakfalvi Ritának, Mogyorósi Károlynak, Német Józsefnek, Szabó Tamásnak és Körösi Lászlónak kiváló kísérleti munkájukért, a NATO Tudomány a Békéért programnak, az OM és az OTKA pályázati programjainak kutatásaim anyagi támogatásáért.

Kulcsszavak: *kolloid állapot, reakciók nanométeres tartományban, önszervezõdés, nanoreaktorok, nanorészecskék határfelületeken*

IRODALOM

B. Nagy János – Gourgue, A. – Derouane, Eric G. (1983) Preparation of Monodispersed Nickel Boride Catalysts Using Reversed Micellar Systems. Studies in Surface Science and Catalysis 16, 193-201.

Dékány Imre – Túri L. – Galbács G. – Fendler, J. H. (1999): Cadmium Ion Adsorption Controls the Growth of CdS Nanoparticles on Layered Montmorillonite and Calumite Surfaces. Journal of Colloid and Interface Science. 213, 584-591.

Dékány Imre – Nagy L. – Turi L. – Király Z. – Kotov, N. A. – Fendler, J. H. (1996): Preparation and Characterization of CdS and ZnS Particles in

Nanophase Reactors Provided by Binary Liquids Adsorbed at Colloidal Silica Particles. Langmuir. 12, **15**, 3709-3715.

Kotov, Nicholas A. – Dékány Imre – Fendler János H. (1996): Ultrathin Graphite Oxide-Polyelectrolyte Composites Prepared by Self-Assembly: Transition between Conductive and Non-Conductive States. Advanced Materials. 8, **8**, 637-641.

Kotov, Nicholas A. – Haraszti T. – Túri L. – Zavala G – Geer, R. E. – Dékány I. – Fendler J. H. (1997): Mechanism of and Defect Formation in the Self-Assembly of Polymeric Polycation-Montmorillonite Ultrathin Films. Journal of the American Chemical Society. 119, 6821-6832.

Papp Szilvia – Szűcs Anna – Dékány Imre (2001a): Preparation of Pd Nanoparticles Stabilized by Polymers and Layered Silicate. Applied Clay Science. 19, 155-172,

Papp Szilvia – Szűcs Anna – Dékány Imre (2001b): Colloid Synthesis of Monodisperse Pd Nanoparticles in Layered Silicates. Solid State Ionics. 141-42, 169-176.

Szűcs Anna – Haraszti T. – Dékány I. – Fendler, J. H. (2001): Measurements of Interaction Forces Between Polycations, Between Clay Nanoplatteles and Between Polycations and Clay Nanoplateles by Atomic Force Microscopy. Journal of Physical Chemistry B. 105, 10579-10587.

Vinodgopal, Kizhanipuram – Kamat, Prashant V. (1995): Enhached Rates of Photocatalyitic Degradation of an Azo Dye Using SnO_2/TiO_2 Coupled Semiconductor. Environmental Science and Technology. 29, 841-845.

Yamanaka, Shoji – Nishihara, T. – Hattori, M. – Suzuki, Y. (1987): Preparation and Properties of Titania Pillared Clay. Materials Chemistry and Physics. 17, **1-2**, 87-101.

NANOSZERKEZETÛ BEVONATOK

Kálmán Erika
a kémiai tudományok doktora, igazgató, Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet;
MTA Kémiai Kutatóközpont Felületmódosítás és Nanoszerkezetek Osztály
kale@chemres.hu

Csanády Andrásné Bodoki Ágnes
az MTA doktora, tudományos tanácsadó, Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet
csanady@bzaka.hu

Az anyagtudomány változása a századfordulón, és a nanoszerkezetû anyagok kutatásának összefüggései

Az új elméleti felismerések (kvantummechanika) és az anyag szerkezetét egyre „nagyobb felbontással elemzõ", azaz több részletet feltáró vizsgálati módszerekkel megszerezhetõ tapasztalataink folyamatosan alakítják át, tökéletesítik világunk már meglévõ technológiai eljárásait. *Alapvetõ szemléletváltást indítottak el gondolkodásunkban, és az emberi fantázia számára új, a korábbinál sokkal tágabb lehetõségeket kínálnak*. Segítik az emberiség törekvéseit: a nyersanyagokkal történõ takarékosabb gazdálkodást, a mind mechanikai, mind kémiai szempontból tartósabb, megbízhatóbb szerkezeti anyagok elõállítását. Magasabb szintre emelik, reprodukálhatóbbá teszik a korábban kidolgozott eljárásokat. Az egyre nagyobb figyelmet követelõ nanotechnológia gyakorlati alkalmazásai nem csak a „különlegességek" körében keresendõk, új lehetõségeket teremtenek a nagy mennyiségben termelt szerkezeti anyagok megújítására is.

Az *anyagtudomány korábbi*, hagyományos és úgynevezett új technológiái egyaránt *jelentõs energia* felhasználásával *nagy mennyiségû anyag* lehetõ *leghatékonyabb átalakítását* célozták.

Az *anyagtakarékosságra való törekvés* egyre erõsebb kényszere következtében azonban már régóta alkalmazzák a nagyobb mennyiségben elõállított gyengébb minõségû alapanyagok mechanikai és/vagy korróziós tulajdonságainak javítása érdekében *a hordozóknál nagyobb értékû és az alapanyagoknál értékesebb tulajdonságú bevonatokat.* Ezek az eljárások a hordozó felületén építenek fel fizikai vagy kémiai módszerekkel a hordozó anyagától eltérõ szerkezeteket. A bevonatok elõállítása különösen nagy lendületet kapott a 20. század utolsó évtizedeiben kifejlesztett új technológiák elterjedésével. A metallurgia szerkezeti, összetételi és morfológiai szempontból metastabil szerkezeteit, lényegében az új technológiákkal elõállítható új anyagok jellegzetes tulajdonságait David Turnbull (1981) foglalta össze.

Fenti új technológiák egyre szélesebb körben való elterjedését követõen, Herbert Gleiter (1989) tevékenysége nyomán indult el a *nanoszerkezetû anyagok* intenzívebb kutatása. A szerzõ kísérleti munkája során felismerte, hogy a <100 nm-es szemcseméretû (krisztallitméretû) anyagok tulajdonságai jelentõsen eltérnek az azonos összetételû, de nagyobb szemcsékbõl (krisztallitokból) álló anyagok tulajdonságaitól (Gleiter, 2000). A tulajdonság-vizsgálatok *általában a ko-*

rábbiaknál kedvezõbb használati tulajdonságokra (mechanikai, mágneses, korróziós stb.) utaltak. Az anyagokat felépítő egységek méretének csökkentése a termékeket esetenként új funkciók (multifunkciók) betöltésére is alkalmassá teheti. Nyilvánvaló azonban, hogy az anyagok szerkezetét és morfológiáját elektronmikroszkópokkal – elsősorban transzmissziós elektronmikroszkóppal és felületanalitikai eszközökkel évtizedek óta vizsgáló kutatók (azaz a *nanodimenziókat* vizsgáló kutatók) már jó ideje az anyagok azon *nanoszerkezeti* sajátosságaival foglalkoztak, amelyek *megnövekedett fontosságúvá* csak a 90-es években váltak, és 2001-től kerültek a kutatások előterébe.

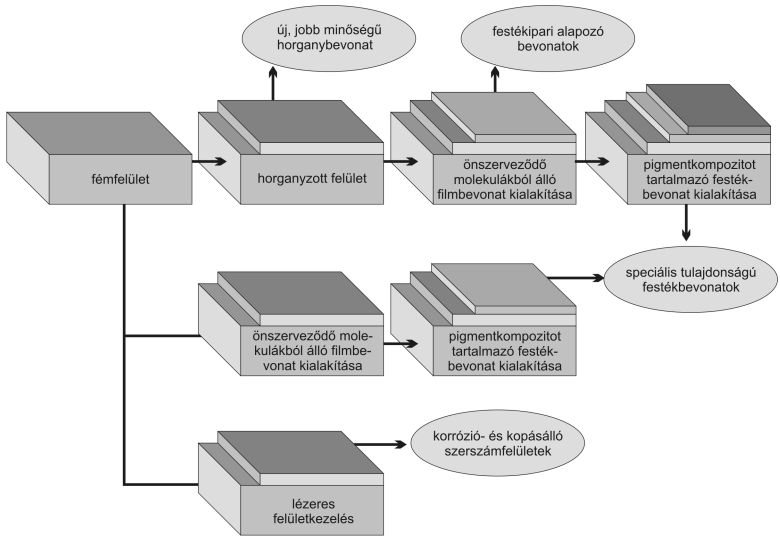
Az iparilag legfejlettebb államok (elsősorban az USA és Japán, majd ezt követően az Európai Unió), felismerve a nanoszerkezetű anyagok mind szélesebb körű és mind nagyobb számú potenciális alkalmazási lehetőségeit, a nanotechnológiával kapcsolatos kutatások finanszírozására igen jelentős és folyamatosan emelkedő összegeket fordítanak. Az Európai Unió 6. keretprogramjának egyik kiemelt témája a nanotechnológiával kapcsolatos kutatás-fejlesztés.

A nanoszerkezetû anyagok elõállítási technikái – egy-két kivétellel – a nem egyensúlyi (metastabil) anyagok (advanced materials) előállítására évtizedek óta alkalmazott, jól ismert eljárások, nem is beszélve a kolloid kémia még sokkal hosszabb múltra visszatekintő technikáiról. Ezen eljárások során a *szemcsék* és/vagy *fázisok mérete, szerkezete, összetétele és morfológiai sajátosságai* a technológiai paraméterek célirányos megválasztásával változtathatók. A *nanokristályos anyagok elõállítása céljából* olyan technológiai paramétereket kell alkalmazni, amelyek következtében az előállítások során bekövetkező fázisátalakulások során *a nukleáció sebessége növekszik*, míg *a szemcseméret növekedési sebessége csökken* (Suryanarayana, 1999).

Kiinduló fázis	Technológia	A termék jellege*
Gáz-gőz	Inert gázos kondenzáció	3 D
	PVD: párologtatás és porlasztás	1 D
	Plazmatechnológiák	3 D
	CVD	3 D, 2 D
	Kémiai reakciók	3 D
Folyadék	Gyorshűtés	3 D
	Elektrokémiai leválasztás	1 D, 3 D
	Kémiai reakciók	3 D
Szilárd	Mechanikai őrlés	3 D
	Devitrifikáció	3 D
	Lézeres abláció	3D
	Szikraforgácsolás	3 D
	Csúszó-koptatás	3 D

*részecske, szemcse (3D), szál, tű (2D), vékonyréteg, film (1D)

1. táblázat • A nanoszerkezetű anyagokat előállító technológiák csoportosítása a kiinduló fázis halmazállapota szerint, a keletkező anyag nanodimenzióinak feltüntetésével. A felsorolt eljárásokkal mind *tömbi szerkezeti anyagokban,* mind *bevonatokban felhasználható és kombinálható* (kompozitként alkalmazható) komponenseket, kiindulási elemeket állíthatunk elő. A *csak tömbi* szerkezeti anyagok céljaira alkalmazott *nagymértékû képlékeny alakítás* módszerét táblázatunkban nem tüntettük fel.



1. ábra • A NANO-TECH NKFP pályázat technológiái és termékei

A funkcionális nanoszerkezetű bevonatok kutatása és fejlesztése mind az MTA Kémiai Kutatóközpont Felületmódosítás és Nanoszerkezetek Osztályán, mind a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetben központi feladat. Az alapkutatást az OTKA a T-037643 projekt (2002-2005) keretében támogatja. A nemzeti kutatási-fejlesztési programban (NKFP) kilenc konzorciumi taggal közösen sikeresen pályáztunk a ***Különleges tulajdonságú nanoszerkezetû bevonatok (NANO-TECH, OM 00290/2002)*** című projekttel (2002–2004, koordinátor: Kálmán Erika). Ennek keretében feladatunk új típusú korrózióvédő bevonatok, nanostruktúrák, vékonyrétegek és festékipari alapozók kutatás-fejlesztése.

Míg a felületmódosító kémiai eljárásokat és a felületvizsgáló módszereket (STM, AFM, EC-STM, EC-AFM, EQCM, nanokeménységmérés, stb.) az MTA KK-ban fejlesztik, az egyéb nanoszerkezet-előállító technológiák fejlesztése (pulzáló elektrokémiai leválasztás, mechanikai ötvözés, gyorshűtés, lézertechnológiával előállított bevonatok) a BAYATI kutatási területei.

A felsorolt eljárásokkal mind ***tömbi szerkezeti anyagokban,*** mind ***bevonatokban felhasználható és kombinálható*** (kompozitként alkalmazható) komponenseket, kiindulási elemeket állíthatunk elő. A ***csak tömbi*** szerkezeti anyagok céljaira alkalmazott ***nagymértékû képlékeny alakítás*** módszerét táblázatunkban nem tüntettük fel.

A bevonatok nanoszerkezetei

Ezeket három fő csoportba sorolhatjuk:

1. ***A mindenkori atmoszférával érintkezõ határfelületek***

- Természetes és/vagy hőkezeléssel képződött ***nanoszerkezetû felületi*** (például oxid) ***rétegek***,
- Felületmódosító kémiai eljárások:
  - ***önszervezõdõ rétegek***
  - ***szol-gél eljárás***
  - ***LB-technika***

2. A ***„tömbi“ belsõ szerkezetek, azaz*** a különböző technológiákkal előállított – esetenként µm vastagságú heterogénszerkezetű bevonatok ***belsõ felépítése,*** szemcseszerkezete, esetleges kiválásai, kompozitáló ágensei. Ezen alkotóelemek ***nanoméretei*** új és

az eddig ismerteknél jobb tulajdonságokhoz vezethetnek, például:

- Elektrokémiai bevonatok:
  - *pulzáló elektrokémiai leválasztás*
  - *pórusos anódos oxidrétegek*
- Lézertechnológiával előállított bevonatok

3. A *szubsztrátum (bevont anyag) és bevonat határfelületén keletkezõ nanoszerkezetek, fizikai és kémiai anomáliái:*

- szilárd-szilárd interdiffúziós folyamatok nanoszerkezetű termékei
- fémolvadékban fémen lejátszódó folyamatok során kialakuló nanoszerkezetű rétegek.

A nanoszerkezetű anyagok szintézisének és felépítésének *kritikus problémája az ellenõrzés módja.*

A különböző *szintetizáló eljárások sokfélesége* ellenére a technológiáknak két lényeges területet kell ellenőrizniük:

A nanoklaszterek, részecskék, szemcsék, *rétegek méreteit és összetételét* (függetlenül attól, hogy aeroszol-részecskékről vagy kvantumdotokról, stb. van szó).

A *határfelületeket és ezeknek eloszlását* a véglegesen kialakított, immáron összeépített anyagban (amennyiben az anyag *bulk* termékként vagy *bevonatként* kerül majd alkalmazásra).

Ez a két döntő ellenőrzési kényszer szorosan összefügg. Lényegében *a nukleáció és növekedés szabályozásáról* van szó. A második meghatározza a felépített nanoszerkezetek kémiai, termikus és időbeli stabilitását, mechanikai és egyéb azon lehetőségeit, hogy miképpen valósulhatnak meg a viszonylagosan olcsó és „tömeggyártásra" alkalmas technológiák. Ezek az ellenőrzések csak az egyre nagyobb feloldású és érzékenységű szilárdtest- és felületvizsgáló vizsgáló eljárások segítségével valósulhatnak meg (TEM, XRD, AES, XPS, STM, AFM, stb.).

Egyes nanoszerkezetű bevonatok fejlesztése részét képezi a NKFP NANO-TECH témában alakított konzorciumi munkának.

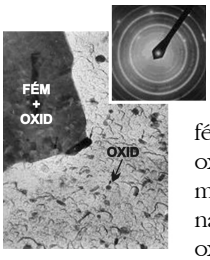
Természetes és hõkezeléssel képzõdött oxidrétegek

A fémek túlnyomó hányadán szobahőmérsékleten és szokásos atmoszférán egy őket a környezettől elhatároló, passziváló felületi réteg jön létre. Ezek az általában nanoszerkezetű rétegek különböző felépítésűek és minőségűek. A fémek-ötvözetek oxidációja jellegzetesen heterogén reakció: határfelületeken és egymást követő lépésekben következik be. A bruttófolyamat sebessége és mechanizmusa a határfelületen létrejött kémiai reakció sebességén kívül a reagensek utánpótlásának sebességétől is függ. Ez az utánpótlás diffúzió útján megy végbe. Az új fázis kialakulását befolyásoló tényezők a fázis nukleációjának sebessége és a csírák, azaz a fázis továbbnövekedésének sebessége. Mivel egymás után következő folyamatokról van szó, az egész folyamat sebességét a legkisebb sebességi állandójú, tehát a leginkább gátolt részfolyamat határozza meg.

A tiszta alumínium felületén szobahőmérsékleten egy ún. záróréteg barrier jön létre. E réteg vastagsága 1-2 nm. Nedves atmoszférában a rétegvastagság több hónap után a 10 nm-t is elérheti.

A magnézium ötvöző, oxidképző hajlama erősebb az alumíniuménál. Már szobahőmérsékleten is jelentékeny mennyiség van belőle az alumínium szilárd oldatban, és az oldhatóság igen nagy mértékben fokozódik a hőmérséklet növelésével. Hőkezelés hatására már a kis hőmérsékletű hőkezelési szakaszban jelentékeny mennyiség épül be az amorf alumíniumoxid-rétegbe, majd ezt követi a kristályos oxidok megjelenése. Nemcsak az amorf alumíniumoxid réteg 1D nanoszerkezetű réteg, hanem, amiképpen a *2. ábra* mutatja, a keletkező kristályos oxidok is 3D szerkezetű nanokristallitok.

A természetes és termikus oxidrétegek számos felületkezelő eljárásnál hatással vannak a bevonat tulajdonságaira.



2. ábra • AlMg (6 t%) ötvözet felületén 450 °C-on végzett hőkezelés (20 perc, 10^{-4} Pa) hatására a fém és az amorf alumíniumoxid között megjelenő primer ~100 nm-es Al_2MgO_4 nanokrisztallitok az amorf oxidban képződő szekunder ~10 nm-es MgO nanokrisztallitok. (Csanády Ágnes (1980): Die „insitu" Elektronenmikroskopie und ihre Anwendung zur Untersuchung der chemischen Prozessen. Metall, **34,** 149-52.)

Felületmódosító kémiai eljárások

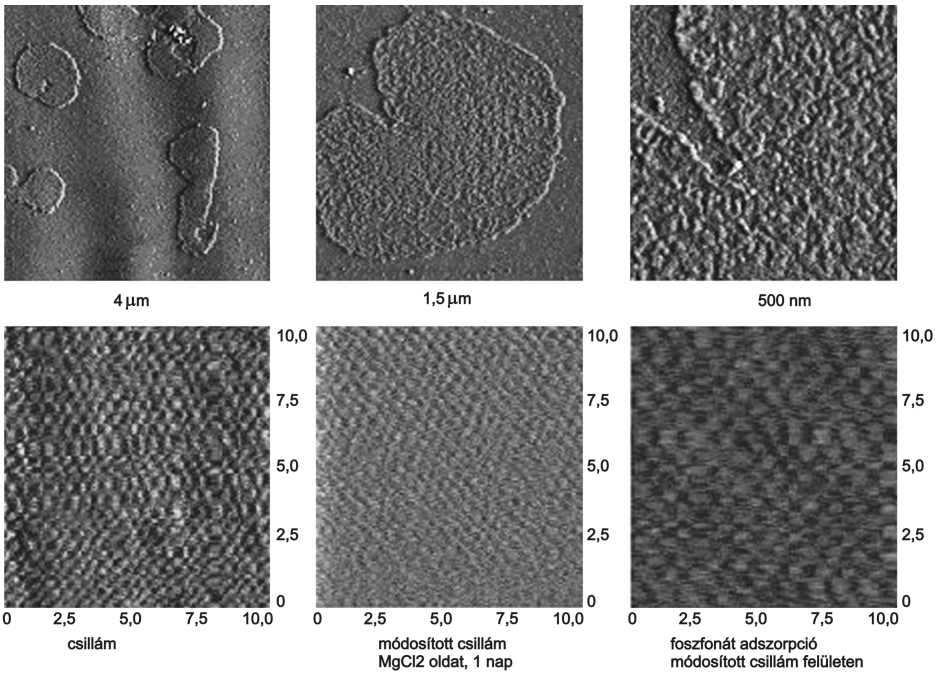
Önszervezõdõ rétegek

Napjainkban az oldatokból önszerveződött mono- és multimolekulás rétegek szerkezetének vizsgálata igen jelentős kutatási irányzatot képvisel a felülettudományban. Az önszerveződő rétegek molekuláinak nagyfokú rendezettsége és szoros illeszkedése a fémfelületen számos gyakorlati alkalmazás útját nyitotta meg. A filmek befolyásolják többek között a felület nedvesítő képességét, tribológiai tulajdonságait, nanokeménységét, valamint korróziós inhibitorként viselkednek. A felület molekuláris manipulációjának célja továbbá olyan szupramolekuláris rendszerek készítése, amelyek elektronikus műveletekre alkalmasak (kapcsolás, egyenirányítás, erősítés molekuláris méretekben).

A molekulák kémiai önszerveződése oldatfázisban egy spontán lejátszódó folyamat, mely során a szubsztrátum felületén az önszerveződő molekulák oldatába merítésekor lejátszódó adszorpció és spontán szerkezeti rendeződés következtében a kialakuló felületi rétegek struktúráját nagyfokú molekuláris rendezettség jellemzi. Az önszerveződés a komponensek szupramolekuláris hierarchikus rendeződése. Fémek felületén kialakított önszerveződött monorétegek (SAM) szerves határfelületet képeznek, melynek tulajdonságai elsősorban a filmet képező molekulák végcsoportjának kémiai tulajdonságaitól függnek. Az önszerveződött monorétegek kiváló modellrendszert biztosítanak a határfelületi folyamatok és a szerkezet-tulajdonság összefüggések alapszintű kutatása számára, valamint lehetőség nyílik a felület szerkezeti és kémiai tulajdonságainak szabályozására, a határfelület tulajdonságainak (nedvesedés, kémiai reaktivitás, adhézió) tervezésére. A nagyfokú molekuláris rendezettség lehetővé teszi alkalmazásukat elektronikai, elektrooptikai készülékekben, nanotechnológiai eljárásokban, a rétegek tulajdonságainak egyszerű alakíthatósága felhasználható új piezoelektromos eszközök, nemlineáris optikák, kémiai és biokémiai szenzorok készítésénél, tömör és stabil szerkezetük következtében felmerült védőbevonatként történő alkalmazásuk (korrózióállóság, kopásállóság).

Az önszerveződött rétegek tömör és stabil szerkezetének köszönhetően számos korrózióvédelmi alkalmazásuk merült fel, mint például korrózió gátló és tapadást növelő tulajdonságuknak köszönhetően átmeneti korrózióvédelem, felület-előkezelés festési eljárás előtt, valamint adalékanyagok környezetbarát bevonatrendszerekhez.

Az önszerveződő molekulák korrózióvédő alkalmazására már történtek próbálkozások tiolszármazékokkal, amelyeknek gyakorlati alkalmazása toxikus hatásuk miatt korlátozott. Gyakorlati szempontból sokkal jelentősebb olyan környezetbarát vegyületek alkalmazása, melyek oxiddal/hidroxiddal borított fémfelületen képesek rendezett szerkezetű felületi rétegeket kialakítani. Környezetbarát vegyületként alkán mono- és difoszfonsavakat sikeresen alkalmaztak védőrétegek kialakítására fémfelületeken (Maege, 1998, Felhősi, 2002/a; Póczik, 2000; Felhősi, 2002/b). A molekulák önszerveződésének egyik ígéretes alkalmazási területe az adhéziónövelő felületmódosítás festési eljárás előtt. Az önszerveződő molekulák egyik reaktív végcsoportja a fémfelületével alakít ki kölcsönhatást, míg a másik vég-



3. ábra • a.) 1-Foszfono-oktán réteg szigetes szerkezete csillám felületen 18 óra után; a szigetek magassága (1,4 nm) megegyezik az 1-foszfono-oktán molekula hosszával; b.) Atomi felbontású AFM felvételek a csillám-, módosított csillám- és foszfonátréteg szerkezetéről

csoport a szerves bevonathoz kötődik. Ezáltal a fém és szerves bevonat között erős stabil kötés jön létre, így ez a felületmódosítási eljárás a kromát konverziós rétegek potenciális helyettesítő eljárásává válhat.

Az 1-foszfono-oktán vizes oldatából kialakuló monomolekuláris réteg szerkezetét atomi erő mikroszkópos (AFM) vizsgálatokkal tanulmányoztuk csillámon mint atomosan sík modell felületen. Megállapítottuk, hogy az 1-foszfono-oktán adszorpciója során először ún. „domain"-képződés játszódik le (lásd *3/a. ábra* 18 óra kezelés után), melyek növekedésével ezek a szigetek idővel összenőnek. Teljes borítottságot mintegy 60 óra után értünk el.

A csillám felülete negatív eredő töltésű, mely energetikailag nem kedvez a foszfonátok adszorpciójának, ezért kísérleteket végeztünk módosított csillám felületen is. A felületmódosított csillámon rendezett négyszöges szerkezetű monomolekuláris réteg alakul ki egy nap után *(3/b. ábra)*. Az ily módon, önszerveződéssel kialakult monomolekuláris réteg kiváló modellrendszert eredményez szerves hidrofób felületek további tanulmányozására.

Bizonyos kísérleti körülmények között mono- és difoszfonsavak vizes oldatából kialakítható rendezett szerkezetű adszorpciós réteg vas felületen anélkül, hogy megindulna a szubsztrátum korróziója. A kialakított foszfonátrétegek kiváló korrózióvédő hatással rendelkeznek.

A foszfono-vegyületek korrózióvédő hatását armco-vas (99,8 % tisztaságú) felületen tanulmányoztuk. A szénatomszám függvényében a korrózióvédő hatás maximumos görbét ír le, legjobb védőhatást az 1-foszfono-oktán esetében tapasztaltunk. A réteg-

növekedést *in situ* elektrokémiai impedancia spektroszkópia vizsgálatokkal követtük nyomon, ahol a polarizációs ellenállás növekedése a rétegben lejátszódó rendeződésre utal. Megállapítottuk, hogy a monofoszfonátok vizes oldatokból tömör szerkezetű hidrofób tulajdonságú védőréteget alakítanak ki az aktív vas felületén. Korábban, az irodalomban csak passzív fémeken (mint például alumínium), illetve indifferens felületeken kialakított rendezett szerkezetű alkil-foszfonát réteget írtak le. A monofoszfonátok gyors adszorpcióját egy nagyságrenddel lassabb rendeződés követi, mely során a molekulák rendeződésével párhuzamosan az adszorpciós rétegben hidratált vízmolekulák kiszorulása játszódik le.

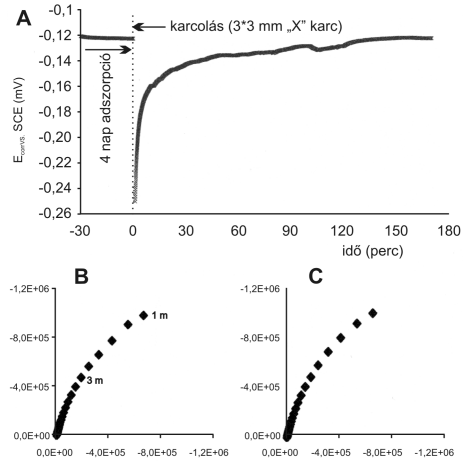
Megállapítottuk az *in situ* elektrokémiai impedancia spektroszkópia segítségével, hogy az adszorpciót Langmuir típusú kinetika jellemzi. A rendeződéses folyamat összetett kinetikájú, ahol az intermolekuláris kölcsönhatást is figyelembe kell vennünk.

A védőrétegek inhibíciós hatása elsősorban blokkoló tulajdonságában jelentkezik, az aktív fémoldódás sebessége jelentős mértékben csökken.

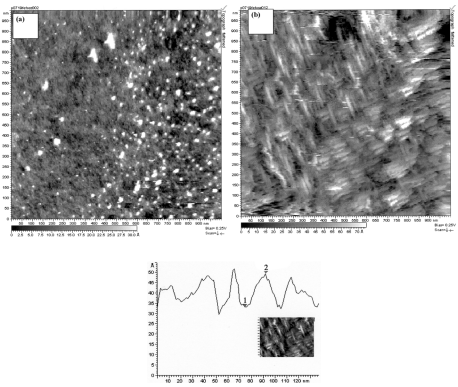
Vizsgálataink alapján a foszfonátok nem csak önszerveződő, hanem ún. „öngyógyító" tulajdonsággal is rendelkeznek. A felületet aktiválva – mechanikai karcolással – a foszfonátréteg a sérült helyen újból kialakul ***(4. ábra).***

A vasfelület, illetve az adszorpciós rétegek *in situ* megfigyelését pásztázó alagútmikroszkóppal (STM) Fe(110) felületen, a 10^{-3} M 1,7-difoszfono-heptán (DPH) argon buborékoltatással oxigénmentesített oldatban (pH=7) *in situ* végeztük. A mérés közben a minta feletti teret argongázzal folyamatosan öblítettük. Az előkezelés hatásaként az inhibitor viszonylag oxidmentes felületre adszorbeálódhatott.

Az *5a. ábrán* az oxidréteg növekedésének kezdeti szakasza látható, lokális pontszerű kiinduló fázissal. Feltételezhető, hogy



4. ábra • Armcovas elektród korróziós potenciálja (a) 10^{-3} M 1,7-difoszfono-heptán oldatban (pH=7) karcolás előtt és után, illetve impedancia spektruma karcolás előtt (b), és után 3 órával (c)



5. ábra • Az Fe(111) felületen kialakult adszorpciós réteg szerkezetének STM felvétele (a) 15 perc és (b) 50 perc után 10^{-3} mol.dm^{-3} 1,7-difoszfono-heptán oxigénmentesített oldatában, illetve (c) a kialakult réteg szerkezetének keresztmetszeti analízise 55 perc után (Póczik Péter – Felhősi I. – Telegdi J. – Kalaji M. – Kálmán E. (2001): Layer Formation by 1,7-diphosphophono-heptane. Journal of the Serbian Chemical Society. 66**, 11-12**, 859-870)

ezeken az ún. oxidos pontokon kötődik meg az inhibitor. 45-50 perc elteltével a felületen átrendeződés, orientált formációk megjelenése figyelhető meg. Két jellemző irány látható melyek 90±5 fokos szöget zárnak be egymással *(5b. ábra)*. A képeken megfigyelhető alakzatok magassága átlagosan 10 és 20 A közé esik – mely a DPH molekulák hosszának nagyságrendje –, míg szélességük a több száz angströmöt, illetve hosszuk akár az ezer angströmöt is elérheti *(5c. ábra)*.

Szol-gél eljárás

Az ún. szol-gél bevonatok és vékonyrétegek előállítása és felhasználási lehetőségeinek vizsgálata az elmúlt évtizedben került a felületkémiai kutatásokkal foglalkozó szakemberek érdeklődésének előterébe. Ezen típusú rendszerek szintéziséhez szükséges alapvető fizikai-kémiai és kolloidkémiai ismeretek ugyan nagyrészt már régóta ismeretesek voltak, „újrafelfedezésük" mégis elsősorban a nanotechnológia térhódításának köszönhető.

Szol-gél eljárás alatt azt a műveletsort értjük, amikor a kialakítandó nanométer vastagságú bevonat alkotóelemeit, vagyis a kolloid mérettartományba eső (1-500 nm átmérőjű) részecskéket az ún. prekurzor anyagból kiindulva folyadék közegben állítjuk elő. A részecskék keletkezésének folyamata minden esetben két egymást követő lépésből áll: először a prekurzor molekulák hidrolízise következik be, majd ezt követően kondenzációs lépések eredményeképpen alakulnak ki a nanoméretű részecskék. Ennek eredményeképpen első lépésben egy stabil kolloid rendszert, azaz szolt állítunk elő. A második lépésben ebből a folyadék közegű rendszerből képezünk egy, még jelentős folyadékmennyiséget tartalmazó (nedves) réteget a bevonandó felületen. Ebből pedig megfelelő szárítási és hőkezelési eljárásokat alkalmazva alakítjuk ki a bevonat végső állapotát, természetesen a tervezett alkalmazásnak leginkább megfelelő módon.

A szol-gél eljárás alkalmazásának számos előnye van az egyéb vékonyréteg-előállítási technikákkal (például PVD és CVD módszerek) szemben, úgymint (Metroke, 2001):

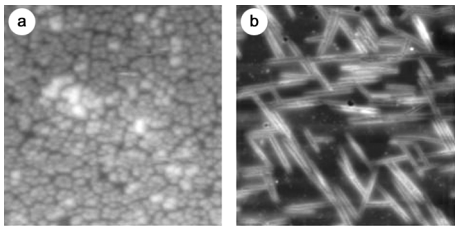
- egyszerű és költségkímélő megvalósítás,
- a kialakítandó rétegek vastagsága egyszerűen és pontosan szabályozható a rétegképzési műveletek ismétlése révén,
- a komponensek aránya és rétegbeli eloszlása jól kézben tarthatóan szabályozható,
- különböző adalékok alkalmazásával a rétegek funkcionalizálása egyszerűen megvalósítható.

Szol-gél eljárással vas- és acélfelületeken ultravékony szilícium- és cirkónium-dioxid rétegeket állítunk elő. *(6. ábra)*

Langmuir-Blodgett rétegek

Szilárd felületen Langmuir-Blodgett-eljárással is alakíthatunk ki nanorétegeket.

Rendezett szerkezetű Langmuir-Blodgett (LB) molekuláris rétegeket már több évtizede tanulmányoznak. Az LB és az önszerveződött rétegek között a film kialakításában van lényeges különbség. Az LB film létrehozásánál az első lépés stabil monomolekulás Langmuir-réteget alakítunk ki filmmérlegben (egy mozgatható kar segítségével). A víz felszínén lévő, vízben nagyon rosszul



6. ábra • AFM felvételek csillámfelületen kialakított ZrO_2 vékonyrétegekről (a: gömb alakú nanorészecskékből felépülő réteg, b: láncszerű aggregátumokat tartalmazó réteg.). A képek mérete: 10 x 10 mm.

oldódó molekulák helyigényét folyamatosan csökkentve hozzuk létre a rendezett szerkezetű szilárd fázist. Ekkor a levegő felé néző hidrofób láncok közti molekuláris kölcsönhatás rögzíti a láncokat s ezzel a réteget. Az önszerveződés során exoterm kemiszorpció jön létre a molekulák és a szilárd hordozó közt. Ezért a molekulák minden lehetséges helyet elfoglalva alakítanak ki egy rendezett, kristályszerkezetű molekuláris réteget.

Az LB rétegek egyre szélesebb körű alkalmazása válik lehetővé számos területen: a molekuláris elektronikától a biokatalizátorokon, a biológiai membránokat utánzó, levegőn stabil kettősrétegen kívül az illló anyagok detektálásáig. Az LB kompozitok alkalmasak elektrontranszportra. Az LB rétegek tanulmányozása lehetővé tette levegő-víz határfelületen biokémiai folyamatok modellezését és a termodeszorpció kvantitatív analízisét.

Az LB filmek korróziós inhibitorként történő alkalmazására is történtek kísérletek (Guo, 1994)

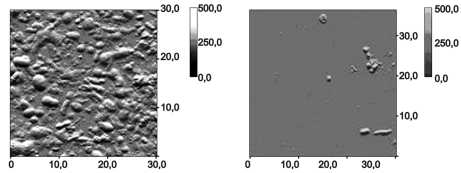
A nanorétegek kialakítási körülményeivel és felhasználási lehetőségeivel az MTA KK-ban az elmúlt években intenzíven foglalkozunk. Egyik fontos vizsgálati területünk a mikrobiológiai lerakódást és korróziót okozó mikroorganizmusok megtapadásának megakadályozása. A monomolekulás réteg izotermái alapján kiválasztottuk az LB réteg készítéséhez legmegfelelőbb körülményeket. A hordozók különböző szilárd anyagok (szénacél, réz, üveg) voltak. Mikrobiológiai és felületvizsgáló kísérletekkel igazoltuk, hogy a mikroorganizmusok megtapadását üvegen mindkét amfipatikus molekulából kialakított LB rétegek gátolták, szénacélon a nitrogéntartalmú vegyületek lényegesen hatékonyabbak voltak, mint a foszfortartalmúak (Telegdi, 2003).

Újabb kísérleteink a hidroxámsavakból kialakított LB rétegek védőhatásának tanulmányozására irányultak. *(7. ábra)* Elektrokémiai és felületvizsgáló módszerekkel (atomi erő mikroszkóp, pásztázó elektronmikroszkóp) megállapítottuk, hogy a lánchossz növekedésével az inhibíciós hatékonyság lényegesen nő. Ezzel párhuzamosan a részecskék mérete és a felület borítottsága is növekszik, a részecskék méreteloszlása élesen behatárolt. A rétegek számának növelésével egy optimális határig a hatékonyság is növekedett (ez molekulatípustól függően 5-9 réteg).

Elektrokémiai bevonatok
Pulzáló elektrokémiai leválasztás

A nanoszerkezetű anyagok előállítási technológiái közül kitűnik a nem egyensúlyi elektrokémiai eljárás, a pulzáló elektrokémiai leválasztás egyszerűsége és gazdaságossága. A fém- és ötvözet-bevonatok pulzáló árammal történő leválasztásakor a nagy katódos áramimpulzusokat árammentes időtartamok szakítják meg. Ennél az eljárásnál a leválasztott réteg minőségét és szerkezetét az elektrolit összetételén és hőmérsékleten kívül az impulzus paraméterek is jelentősen befolyásolják.

Kísérleteket folytatunk nanoszerkezetű Ni-, Zn-Ni bevonatok, valamint Fe/Fe-oxid multirétegek (Lakatos, 2003) pulzáló árammal történő leválasztására, a bevonatok vizsgálatá-



7. ábra • Az LB réteg szerepe a biofilm kialakulásában; hűtővízből három hét alatt üvegen kialakult biolerakódás atomi erő mikroszkópos képe; (a): kontrollkísérlet, (b): LB réteg oktadecil hidroxámsavból (Telegdi Judit – Rigó T. – Beczner J. – Száraz L. – Kálmán E. (2001): Proceedings of the International Conference On Biofouling and Materials. 33-35)

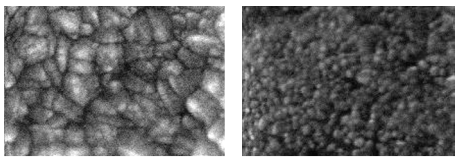
ra és minősítésére. Szisztematikus vizsgálatokkal ellenőriztük, hogy a fürdő összetétele és adalékanyag-tartalma hogyan befolyásolja a bevonatok szemcseméretét. A következő ábra adalékmentes Watts-fürdőből *(8a)* és tartarát *(8b)* komplexképzőt tartalmazó oldatból leválasztott Ni minták SEM felvételeit mutatja. Komplexképzőt tartalmazó fürdő alkalmazása jelentős szemcseméret-csökkenést eredményezett. Hasonló típusú vizsgálatokkal optimalizáltuk a Zn-Ni és a Fe-bevonatok leválasztását.

Vizsgáltuk továbbá a nanoszerkezetű vas passziválódási hajlamát a Fe/Fe-oxid multirétegek előállítása céljából. Ugyancsak tanulmányoztuk a különböző szemcseméretű Zn-Ni ötvözetbevonatok passziválódását Na-szulfát-oldatokban.

Pórusos anódos oxidrétegek

A nagyjelentőségű pórusos szilíciumot, a 90-es években felefedezett különböző lumineszcens (foto-, elektro-, stb.) képességei folytán először 1956-ban anódos oldás és oxidáció segítségével állították elő. (Jeske et al, 1995)

A szintén évtizedekkel ezelőtt korrózióvédelem céljaira kifejlesztett pórusos anódos alumíniumoxid-rétegek is reneszánszukat (ASST Symposium, Bonn, 2003) élik különös tekintettel a nanotechnológiák térhódítására.

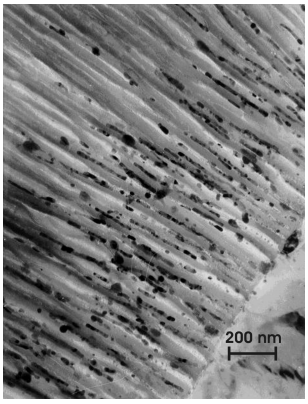


8. ábra • SEM felvételek a K-Na-tartarát komplexképzőt tartalmazó fürdőből leválasztott Ni mintákon (Lakatos-Varsányi M. – Mikó A. – Tury B. – Papp K. – Kálmán E. (2002/a): Korróziós Figyelő. XXXXII., 107–112; Lakatos-Varsányi M. –Kálmán E. (2002/b): 4th EC/ NSF Workshop on Nanotechnology: Tools and Instruments for Research and Manufacturing. Grenoble, France)

Ezeket az alumínium felületén elektrokémiai eljárásokkal kialakítható (és leválasztható) reprodukálhatóan szabályozható szerkezetű nanoléptékű textúrákat különböző nanogyártási célokra (membránok, kompozitok, stb.) kívánják alkalmazni. A *9. ábrán* látható, hogy a dekorativitás céljából fémsókkal színezett, egyébként színtelen anódos oxidréteg pórusaiban a színezési időtől függő hosszban a színező fém minőségétől függő ~10 nm-es 2D fémkrisztallit nanoszálakat lehet előállítani. Csakúgy, mint az anódos oxidrétegekben a szilícium pórusokba is katódosan vagy árammentes eljárással fém nanostrukturákat lehet kialakítani.

Lézertechnológiával elõállított bevonatok

A nagyteljesítményű lézersugárral megolvasztott és túlhevített fémolvadékok a hagyományos metallurgiai eljárásoknál szokásos ötvözőmennyiség akár többszörösét képesek rövid idő alatt feloldani. A rövid ideig tartó intenzív hevítést követő gyors hűlés



9. ábra • Kénsavas elektrolitban egyenárammal előállított anódos oxidréteg színezése céljából, a nanopórusokba elektrokémiai úton leválasztott *~10 nm átmérõjû fémkrisztallitok* TEM felvétel (Csanády Ágnes (1979): Transmission Electron Microscopy and X-ray Analysis of Coloured Films Prepared by Ultramicrotome without Embedding. Journal of Material Science. 14, 2289)

során a szokatlanul nagy csíraképződési és kicsiny növekedési hajlam hatására rendkívül kicsiny kiválások jönnek létre.

A kezelt térfogatban ennek következtében sajátos szövetszerkezet alakul ki, ami az anyag tulajdonságainak is jellegzetes, újszerű megváltozásához vezet. Megváltoztatható az anyag szerkezete oly módon is, hogy őrlemény formájában (mechanikai ötvözéssel előkészített kompozitáló részecskéket adagolunk a lézersugárral megolvasztott ömledékbe), és ilyen módon alakítjuk ki a megfelelő felületi tulajdonságokat.

Határfelületeken kialakuló nanoszerkezetek

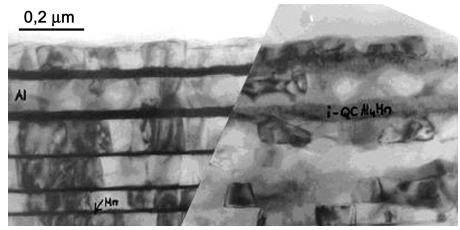
Az új technológiák körének bővülésével – mindenütt, ahol fém hordozókon különböző fizikai vagy kémiai eljárásokkal bevonatokat képezünk, és eközben a hőmérséklet növekedésével is számolnunk kell, vagy nagy fajlagos felületű részecskék érintkeznek más anyagból való közeggel, például kompozitok előállításánál – bekövetkezhetnek határfelületi reakciók és/vagy interdiffúziós folyamatok. (Csanády, 1988). Fenti technológiák különleges családját képezik az olyan bevonat-előállító eljárások, amelyek során egy nagy olvadáspontú fémet egy nála kisebb olvadáspontú fém olvadékával vonunk be. Ilyen például az acél tűzimártó horganyzása.

Az interdiffúzióval létrehozott határfelületi reakciókat csak akkor lehet biztonsággal reprodukálni, ha tisztázottakká válnak a reakciót szabályozó mechanizmusok, és adottak azok műszaki befolyásolási lehetőségei.

Különböző magyarázatokat dolgoztak ki arra nézve, hogy egyes konkrét rendszerekben miért azok a fázisok jelennek meg, amelyek megjelennek, és miért nem azok, amikre a fázisdiagram alapján számítani lehetne. Nyilvánvalónak tűnik, hogy adott konkrét nagyipari technológiáknál is meghatározók az egyes fázisok nukleációjának és növekedésének, továbbá leépülésének (adott esetben oldódásának) egymáshoz viszonyított sebességei. Egy évszázadok óta alkalmazott technológia esetében is találkozhatunk nanoszerkezetek kialakulásának mindmáig tisztázatlan bonyolult folyamatával. Ezek megismeréséhez napjainkban kiváló lehetőségek, vizsgáló technikák (keresztmetszeti TEM, FIB-SEM, stb.) kínálkoznak. Egy szilárd fázis és egy másik szilárd fázis között lejátszódó interdiffúziós folyamatokkal, azaz az intermetallikus fázisok képződésével főképpen vékonyréteg-rendszerekben ***(10. ábra)*** mint analóg folyamatokkal kapcsolatosan mind bőséges ismeretek, mind kialakult vizsgálati háttér (MTA MFA) hazánkban is megtalálható.

Összefoglalás

A nanoszerkezetekkel a tudomány sok évtizede foglalkozik, ám a nanoszerkezetek funkcionális célra tervezett manipulálása, előállítása a XXI. század nagy kihívása. A molekulák kétdimenziós szervezése mellett a nanotechnológia nagy feladata a további nanoarchitektúrák fabrikálásához szükséges, megfelelő méretű és tulajdonságú építőelemek kialakítása. Ezeket az építőelemeket mind kémiai, mind fizikai módszerekkel előállíthatjuk, szervezhetjük. Az önszerveződő



10. ábra • Al/Mn/Al/Mn/Al….. szobahőmérsékleten előállított vékonyréteg rendszerében hőkezelés (300 °C, 1 óra) hatására végbemenő ***intermetallikus nanofázis*** ($QC\text{-}Al_4Mn$) képződése. (Csanády Ágnes – Barna P. B. – Pécz B. – Berek H. (1992): Quasicrystalline Phase Formation and Transformation to Al_6Mn in Al-Mn Thin Film Systems. Electron Microscopy. **2**, EUREM 92, Granada, 5732)

rétegek terminális csoportjainak könnyen befolyásolható funkcionalizálhatósága lehetővé teszi nanoarchitektúrák építését nanorészecske építőelemekből.

A komplex, nanostrukturált bevonatrendszerek kutatása új, különböző funkciókat (esetenként multifunkciókat) ellátó termékek előállításához vezethet. A felületmódosító eljárások közül – a korlátolt terjedelemre való tekintettel – a kémiai módszerekkel (önszerveződés, szol-gél, Langmuir-Blodgett, elektrokémiai) előállítható nanoszerkezetekre helyeztük a hangsúlyt. A nanoszerkezetű bevonatok tudományos kérdéseinek bőséges tárháza további, itt nem tárgyalt tudományos kutatási feladatokat is kínál.

Fontosnak tartjuk azonban, hogy régóta alkalmazott bevonással készített gyártmányok esetében is egyre nagyobb feloldású és érzékenységű vizsgáló módszerek segítségével mind teljesebb képet nyerjünk a bevonatokban megjelenő fázisokról és az ezekért felelős folyamatokról, hogy ezúton szolgáljuk a technológia eredményességét, az előállított termékek versenyképességét.

A tudásalapú, többfunkciós felületi bevonatok nanoszerkezetének kutatás-fejlesztése elősegíti a nagy mennyiségben termelt ipari anyagok minőségének ugrásszerű javulását.

Kulcsszavak: *nanotechnológia, természetes és termikus oxidrétegek, önszervezõdõ molekulák (SAM), Langmuir-Blodgett-rétegek, szol-gél technológia, elektrokémiai módszerek, pórusos nanoszerkezetek, lézertechnológia*

IRODALOM

Csanády Ágnes (Andrásné) (1988): Interdiffúzióval előállított határfelületi fázisok biner alumínium rendszerekben. Magyar Alumínium, 25**, 11-12**, 349.

Di Natale, Corrado – Paolesse, R. – Macagnano, A. – Troitsky, V. I. – Berzina, T. S. – D'Amico, A. (1999): Pattern Recognition Approach to the Study of the Interactions between Metalloporphyrin Langmuir-Blodgett Films and Volatile Organic Compounds. Analytica Chimica Acta. 384, **3**, 249-259.

Guo, Du – Xing, Wei – Shan, Yi-Bin – Lu, Tian-Hong – Xi, Shi-Quan (1994): Inhibition of Corrosion by Hexadecyl Trimethyl Ammonium Bromide Langmuir-Blodgett Monolayers on Carbon Steel. Thin Solid Films. 243, **1-2**, 540-543.

Felhősi Ilona – Kálmán Erika – Póczik, Péter, (2002). Corrosion Protection by Self-Assembly. Russian Journal of Electrochemistry. **38**. 230-237.

Felhősi Ilona – Telegdi J. – Pálinkás G. – Kálmán E. (2002): Kinetics of Self-Assembled Layer Formation on Iron. Electrochim. Acta*,* **47**. 2335-2340.

Gleiter, Herbert (1989): Nanocrystalline Materials. Prog. Mat. Sci. **33**, 223.

Gleiter, Herbert (2000): Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure. Acta mater. **48**, 1-29.

Jeske, M., Schultze, J.W., Münder H., (1995) "Porous Silicon: Base Material for Nanotechnologies", Electrochimica Acta, **40/10**, 1435

Lakatos-Varsányi, Magdolna – Mikó, A. – Varga L. K. – Kálmán E. (2003): Electrodeposited Magnetic Multi Nanolayers. Electrochimica Acta. megjelenés alatt

Kálmán Erika (koordinátor*): NKFP OM-00290/2002 „Különleges tulajdonságú nanoszerkezetû bevonatok fejlesztése környezetbarát felületmódosító eljárásokkal.*

Maege (Mäge), Iris – Jähne, E. – Henke, A. – Adler, H. J. P. – Bram, C. – Jung, C. – Stratmann, M. (1998): Self-assembling Adhesion Promoters for Corrosion Resistant Metal Polymer Interfaces. Prog. Org. Coatings. **34**, 1

Mannan, S. K. – Seetharam, V. – Ragunathan, V. S. (1983): A Study of Interdiffusion between AISI Type 316 Stainless Steel and Aluminium. Materials Science and Engineering. 60, **1**, 79-86.

Metroke, Tammy L – Parkhill, Robert L. – Knobbea, Ed T. – (2001): Passivation of Metal Alloys Using Sol-gel-drived Materials - A Review. Progress in Organic Coatings. **41.** 233-238.

Póczik Péter – Felhősi I. – Telegdi J. – Kálmán, E. (2000): Corrosion Protection Properties of Self Assembling Molecules. in Bonora, P.L. – Deflorian F. (eds.)*: Electrochemical Approach to Selected Corrosion and Corrosion Control Studies*. IoM Communications, in *EFC series,* No. **28**, 3-10.

Telegdi Judit – Rigó Timea – Kálmán Erika (2003): New Types of Corrosion Inhibitors Proc. of LATINCORR-2003, Chile

Suryanarayana, C. (1999): *Non-Equilibrium Processing of Materials*. Pergamon Press

Telegdi J. – Rigó T. – Kálmán E. (2003): Langmuir Monolayers of Hydroxamic Acids Observed by Brewster Angle Microscopy. Langmuir. megj. alatt

Turnbull, David (1981): Metastable Structures in Metallurgy. Metallurgical Transactions A, 12A, 695.

NANOTECHNOLÓGIA A BIOLÓGIÁBAN

Vámosi György
PhD., MTA-DE Sejtbiofizikai Kutatócsoport

Bodnár Andrea
PhD., MTA-DE Sejtbiofizikai Kutatócsoport

Győrffi Miklós
EU DG Research szakértő
DE OEC[1] Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet

Bene László
PhD., DE OEC
Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet

Damjanovich Sándor
az MTA rendes tagja
MTA-DE Sejtbiofizikai Kutatócsoport és DE OEC Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet

A biológiai jelenségek sejt- és molekuláris szintű tanulmányozása a XX. század második felében korábban elképzelhetetlen gyorsasággal fejlődött, és eljutott arra a szintre, hogy lassanként a nanotechnológia fejlesztéséhez is jelentős mértékben képes hozzájárulni. Ha az ötvenes években a biológiai kutatás élvonalába tartozó kutatónak azt mondtuk volna, hogy a mikroszkóp alatt – tehát szemünk kontrollja mellett – egyetlen sejtet felemelhetünk anélkül, hogy az megsérülne, majd a sejt felszínén egyetlen molekulát megragadhatunk és mechanikailag megrángathatunk, vagy hosszú molekulákra szabályos csomót köthetünk, és a csomót jól meghúzva vizsgálhatjuk, hogy képesek vagyunk-e így eltörni a molekulát, azt mondta volna, hogy ilyen lehetetlenségeket legfeljebb a fantáziánk birodalmában lehet végrehajtani.

Más nézőpontból kiindulva azt is mondhatjuk, hogy a nano-biotechnológia az elektronmikroszkóp felfedezésével kezdődött az 1930-as évek közepén. Azonban az elektronmikroszkópos képek vákuumban készültek, így az élő sejtek működésének vizsgálatára csak korlátozottan voltak alkalmasak. Ennek ellenére az elektronmikroszkópia jelentős eredményeket ért el az élő sejtek fénymikroszkóppal nem látható részleteinek feltárásában. A fénymikroszkóp felbontását a diffrakciós limit az Abbe-elv alapján az 1 mikrométer kb. egyötödében szabta meg. Mivel a diffrakció hullámhosszfüggő, a Zsigmondy-féle ultraibolya mikroszkóp valamit javított a láthatóvá tételen, de az alkalmazott fényhullám roncsoló hatásával maga is beleavatkozott a szerkezetbe. Az optikai forradalom akkor kezdődött, amikor megszületett az alagúteffektuson alapuló pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope – STM) (Binnig – Rohrer, 1982). Az STM alkalmazásával látott Gerd Binnig és Heinrich Rohrer először atomokat, majd annak segítségével raktak össze először atomokból egyszerű molekulát. Az atomi erő mikroszkópia (Atomic Force Microscopy – AFM) feltalálásával Binnig hozta létre az elektromos vezetőképességet nem igénylő nagyfeloldású mikroszkópiát is (Binnig et al., 1986). Ennek feloldóképessége folyadékközegben is messze meghaladja a fénymikroszkópét, és valóban látjuk a molekulákat, ha nem is a szemünkkel, de egy nanométer nagyságú heggyel rendelkező, piezoelekt-

[1] Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum

romosan igen pontosan letapogató szerkezet mozgásának leképezésével, amely mozgást a felület nano-domborzati viszonyai befolyásolják. A módszert immun-arany jelöléssel kombinálva sejtfelszíni receptor-mintázatok jeleníthetők meg (Damjanovich et al., 1995; Jenei et al., 1997). Az AFM felhasználható biomolekulák között ható vonzóerők közvetlen mérésére, illetve meghatározott molekulák sejtfelszíni eloszlásának nanométer léptékű feltérképezésére is (Hinterdorfer, 2002). Ebből a célból az AFM-tűhöz kovalensen hozzákötnek egyetlen biomolekulát (például monoklonális antitestet), amely a vizsgálni kívánt sejtfelszíni molekulával specifikus kölcsönhatásban van. A tűt tartó kar meghajlása a kölcsönhatás során fellépő pN (piko=10^{-12}) léptékű erő nagyságára enged következtetni.

A látható fénymikroszkópia forradalmát az hozta meg, hogy a mikroszkópból egyszerűen kihagyták a lencséket, és így eltűnt a diffrakciós limit is, ami a lencse és a fény kölcsönhatásából eredve korlátozta a feloldóképességet (Betzig – Trautman, 1992; Nagy et al., 1999). Ez a feloldás 10 nm nagyságrendű is lehet. Olyan kicsiny átmérőjű optikai szálon lép ki a fény a vizsgálandó felület közvetlen közelében, hogy a fény csak fotonként tud viselkedni, mert a kilépő nyílás kisebb, mint az alkalmazott fény hullámhossza. A közelről megvilágított felületről visszaverődő fotonok információt hordoznak a felület minőségéről. Innen ered a módszer neve is: pásztázó közeli-mező optikai mikroszkópia, vagy általánosan használt angol nevén ***Scanning Near-Field Optical Microscopy*** (SNOM).

A lézerek fénynyomásának vizsgálatakor vette észre Art Ashkin, hogy a könnyű műanyag gömböcskék felugrálnak a lézer fókuszpontjába, és ott is maradnak, amíg a lézert ki nem kapcsoljuk. Ilyen módon lehet sejteket „megfogni" és odébb rakni, illetve manipulálni. Ezt a „szerkezetet" nevezzük optikai csipesznek (Ashkin, 1997).

Napjaink igen fontos, nanométer léptékű távolságmérő módszere a fluoreszcencia rezonancia energiatranszfer (FRET) hatékonyságának meghatározása. A Theodor Förster által 1948-ban leírt sugárzásmentes energiaátadás (Förster, 1948) donor- és akceptorpárként működő fluoreszkáló molekulák között ma már mind a molekuláris, mind a sejtbiológia bevett módszere (Damjanovich et al., 1995; Damjanovich et al., 1997a; Damjanovich et al., 1997b; Nagy et al., 1998; Szöllősi et al., 1998). A Förster-típusú energiatranszfer folyamatok alkalmasak nanométeres távolságok igen pontos megmérésére is, mert a kicsiny távolságokat akár angström szinten képesek meghatározni. Tehát valóban a molekulák világában végzünk finom méréseket, amelyek a molekuláris folyamatok mechanizmusának feltárásához is hozzájárulhatnak. A donor fluoreszcencia anizotrópiájának mérése FRET jelenlétében lehetőséget ad a molekulák konformációs dinamikájának tanulmányozására (Bene et al., 2000). Az orvosi diagnosztikai és sejtbiológiai alkalmazásokban a nagy sebességgel áramló sejteket egyenként megvizsgálni képes sejt-analizátorok és szeparátorok (szorterek) lehetővé teszik, hogy rövid percek alatt immunológiai technikákkal kombinálva sejtek tízezreit vizsgáljuk meg, és eldöntsük, hogy van-e közöttük akárcsak néhány darab beteg sejt. Számos esetben még az egyes betegségek fajtája is meghatározható.

A módszertani felsorolások közül nem hagyhatjuk ki a felszíni plazmon rezonancia jelenségét sem (Tews et al., 1970), amelynek kiváló úttörője Kroó Norbert fizikus-akadémikus. A jelenség alapja – hogy biológiai példánál maradjunk – a következő: a sejtek felszínének immunológiai reakciók segítségével meghatározott molekuláihoz kolloidális arany- vagy ezüstgömböket kötünk, amelyek átmérője 1-50 nm között változhat. Ha a gömböcskék fluoreszkáló molekulák közelében helyezkednek el, azok fluoresz-

cenciáját igen jelentős mértékben felerősíthetik. A rómaiak és a katedrálisépítők aranyport kevertek a festett üvegablakokba, hogy azok jobban csillogjanak. A fluoreszkáló molekulák fényintenzitása ezüstfelület mellett akár kétszázszorosára is fokozódhat. Az aranykolloid sokkal gyengébben erősít, de nincs kitéve korróziónak a sókat tartalmazó nedves biológiai környezetben.

Viszonylag újkeletű, és napjainkban kezdik alkalmazni a nanométer átmérőjű félvezető nano-kristályokat (kvantum-pont), amelyek néhány nanométer átmérőjű CdSe, vagy ZnS pontocskák (Lacoste et al., 2000). Ezeket is hozzá lehet rögzíteni meghatározott biológiai felületekhez (pl. avidin-biotin reakció segítségével). Nagy előnyük abból fakad, hogy a kibocsátott fluoreszcencia színét a nano-kristály átmérője szabja meg, így egyetlen gerjesztő fénysugár hatására a különböző átmérőjű kvantum-pontok másmás színnel jelzik a különböző molekulák lokalizációját, illetve annak változását. A jelenség a dobozba zárt elektron modelljével írható le. Ugyancsak gyorsan kezd terjedni e kvantum-pontok alkalmazása az áramlási citometria világában is. A kvantum-pontok nagy gyakorlati előnye végtelen fotostabilitásuk, ezek a részecskék ugyanis nem égethetők ki, „örök életűek".

A biológia napjainkban kezdi felhasználni a fizikai kémiában már régebben ismert és alkalmazott egyéb nanotechnológiai módszereket is. Az 1970-es évek elején dolgozták ki a koncentráció korrelációs analízis vagy fluoreszcencia korrelációs spektroszkópia (FCS) módszerét (Ehrenberg – Rigler, 1974; Magde et al., 1974) a kis térfogatban lejátszódó reakciók egyensúlyának és kinetikájának, molekulák diffúziójának, fotofizikai folyamatoknak, illetve több molekula együttes mozgásának vizsgálatára. A módszernek a konfokális mikroszkópiával való párosítása – ezáltal a detektálási térfogat drasztikus csökkentése – tette alkalmassá az FCS-t biológiai rendszerek tanulmányozására (Eigen – Rigler, 1994; Brock et al., 1999). Ma már kereskedelmi forgalomban is kaphatók konfokális mikroszkóppal kombinált FCS készülékek. Ezek segítségével a sejtek belsejében vagy felszínén kiválasztott, fókuszált lézernyalábbal megvilágított nagyon kicsiny térfogatban – rendszerint fluoreszcenciával láthatóvá tett – molekulák számának a diffúziós mozgás révén bekövetkező ingadozása detektálható. A módszer alapvetően egyszerű. A térfogat, amely akár 10^{-16} liternél (0,1 μm^3-nél) is kisebb lehet – ez egy limfocita térfogatának néhány tízezred része –, elég kicsiny ahhoz, hogy benne a jelzett molekulák száma észrevehető mértékben fluktuáljon. A molekulaszám, és így a detektált jel relatív ingadozása fordítottan arányos a detektálási térfogatban tartózkodó molekulák N átlagos számával (koncentrációjával): $\Delta N/N \propto 1/\sqrt{N}$, aminek következtében a módszer érzékenysége a koncentráció csökkenésével eleinte nem csökken, hanem növekszik. FCS segítségével olyan alacsony koncentrációtartomány válik elérhetővé (a detektálási küszöb kb. 10^{-15} M), amely messze a hagyományos spektroszkópiai eljárások zajszintje alatt található. A fluktuáció kinetikájának analízise – lényegében minden adatot az azt megelőzőkhöz hasonlítunk, ezért is nevezzük korrelációs analízisnek – olyan görbét, ún. autokorrelációs függvényt eredményez, amelyből a megfigyelt molekulafajta diffúziós állandója és lokális koncentrációja a térfogat ismeretében meghatározható *(1. ábra)*. Így például kimutatható egy festékkel megjelölt molekula (gyógyszer hatóanyag, enzim szubsztrátum, oligonukleotid, antitest, stb.) kötődése kölcsönható partneréhez, ami által a molekula diffúziója lelassul. Ha két molekulát vizsgálunk egyidejűleg (kétszín analízissel), akkor a köztük esetleg fennálló keresztkorreláció (együtt-mozgás) is kiszámítható, és a kölcsönhatás még nagyobb érzékenységgel mutatható ki (Schwille et al.,

1997). Ez a módszer a sejtek molekuláris szintű kölcsönhatásainak a szinte egyetlen vagy legalábbis néhány molekulára leszűkíthető vizsgálatát teszi lehetővé. Ilyen feloldású vizsgálatok *in vivo* rendszerekben eddig nem léteztek. A módszert már ma is széleskörűen alkalmazzák a gyógyszeriparban. Tervezik felhasználását betegségek, fertőzések (például: HIV, prionok, Alzheimer-kór) korai felismerésére a néhány sejten/sejtben megjelenő vírusantigének, fehérje-aggregátumok fluoreszkáló antitestekkel való megjelölése és kis koncentrációban történő kimutatása segítségével.

Természetesen a molekuláris biológia sem marad le a nanotechnológiai módszerek alkalmazásában. A felsorolt módszerek csak illusztrálják a nanotechnológia orvosi-biológiai alkalmazásainak lehetőségeit. Valamivel átfogóbb képet kaphatunk az általános tendenciákról, ha szerzőtársunk segítségével az alábbiakban megvizsgáljuk, hogy az Európai Unió központi szervei milyen irányokat támogatnak az EU keretprogramjain belül.

FÜGGELÉK
Nano-biotechnológia az EU kutatási keretprogramjaiban

A nanotechnológia multidiszciplináris tudományterület. Művelésében anyagtudósok, gépész- és villamosmérnökök, orvoskutatók szövetkeznek biológusokkal, fizikusokkal és vegyészekkel. A tudás, az eszközök és eljárások, valamint az atomi és molekuláris szintű kölcsönhatások ismeretének megosztására, átadására felmerülő igény egyesíti a nanoméretekben folytatott kutatás különböző területeit. Az új fogalmaknak és eljárásoknak (például az atomi léptékű képalkotás és mozgatás, az ön-összeszerelődés, a biológiai struktúra-funkció kapcsolat ismerete) az egyre hatékonyabb számítástechnikai háttér segítségével való összehangolása serkenti a nanotechnológia gyors fejlődését, a kutatók pedig szakértelmüket új alkalmazási területekre terjeszthetik ki.

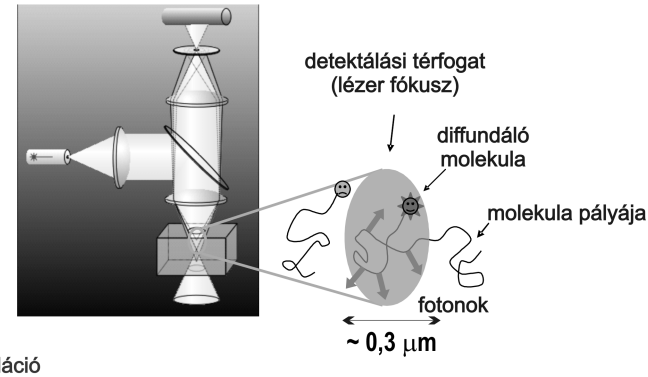
A nano-biotechnológia (a „posztgenomikus" biotechnológia) lehetővé teszi a kutatást az egyedi molekulák és atomok szintjén. Az egyik legjellegzetesebb, már rendelkezésre álló kereskedelmi termék a biochip, amely forradalmasítja a gének és termékeik kvantitatív analízisét a biotechnológia és biomedicina területén.

A korábbi keretprogramokban (KP) az Európai Bizottság megalkotott egy, a nanotechnológiával foglalkozó kutatási portfoliót. Az 1994-1998 közötti 4. KP mintegy hetven projektet támogatott ezen a területen. A nano-biotechnológiai kutatások a BioTech és a BioMed programokat támogatják (gyógyszerfelszívódás – inkapszuláció, bio-esszék, stb.)

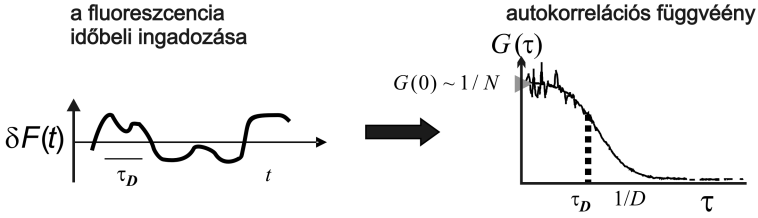
Az 5. KP-ban a nano-biotechnológiai kutatásokat az *Életminõség tematikus program* „*Cell Factory*" kulcsakciója, ezen belül is *Az élõ szervezetek sejt- és molekula-szintû jellemzõinek felhasználása új nano- és mikrotechnológiák kifejlesztéséhez* című 3.3.1 alprogram támogatta (EC1). A program célja a sejtek működésén (mint „biológiai gyárakon") alapuló innovatív kutatások és technológiák, valamint ezeknek az egészségügy, a környezetvédelem, a mezőgazdasági ipar, stb. területén való alkalmazásának támogatása. Ez magában foglalja az új nanotechnológiai eszközök biológiai rendszerekben való alkalmazását, valamint a biológiai rendszerek eszközként való felhasználását új termékek és technológiák kifejlesztésében. A *Cell Factory* program nyolc nano-biotechnológiai projektet támogatott ***(1. táblázat)*** (Benediktsson, 2002).

Az Európai Bizottság új, 6. keretprogramjának kialakítása során az addig szétszórtan jelentkező, nanotechnológiákkal foglalkozó programok új arculatának kialakításához több előkészítő dokumentum született (lásd irodalomjegyzék). Ezek átfogó módon kezelték

FLUORESZCENCIA-KORRELÁCIÓS SPEKTROSZKÓPIA (FCS)



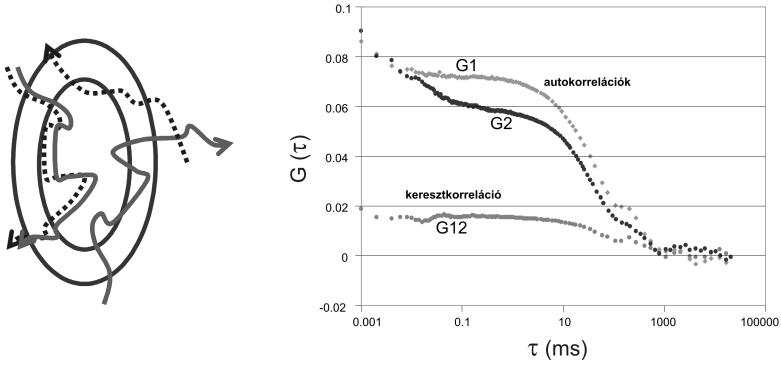
I. Autokorreláció



τ_0: diffúziós idő (a részecske által átlagosan az érzékeny térfogatban eltöltött idő);
D: diffúziós állandó; *G(0):* amplitúdó; N: átlagos molekulaszám a detektálási térfogatban

II. Keresztkorreláció

Két, spektrálisan különböző festékkel megjelölt molekula fluoreszcencia-ingadozása közötti keresztkorreláció a molekulák stabil asszociációját biztosítja.



1. ábra

Cím	Tartalom, célkitűzés
A membránfehérjék és szekretált fehérjék bioszintézisének és célba jutásának vizsgálata	A szekretált és membránfehérjék bioszintézisének és célba jutásának részletes megismerése (komponensek, molekuláris mechanizmusok, szabályozás).
Nano-biotechnológia alkalmazása élesztő rendszerben: biotechnológiai folyamatok optimalizálása ipari, orvosi és mezőgazdasági jelentőségű termékek gyártásában	Nano-biotechnológiai eljárások kifejlesztése a globális génexpressziós tanulmányokból kapott információk felhasználására. Az élesztő „transzkriptomjának” (és következésképpen „metabolomjának”) ellenőrzését végző fehérjék karakterizálása, ami lehetővé teszi az egész genomra kiterjedő szabályozó hálózatok részletes jellemzését, így hatékony, alacsony költségű módszerek alkalmazását orvosi, állatorvosi gyógyszerek tesztelésében, valamint új gombairtók kifejlesztését a növényvédelemben.
Cellulózkötő-doménnel rendelkező hibrid fehérjék előállítása: új biotechnológiai eszköztár kifejlesztése cellulóz-, a papír- és a textilipar számára	Biotechnológiai eszközök kifejlesztése a cellulóz rostok módosítására: cellulózkötő domént és katalitikus vagy egyéb specifikus funkcióval rendelkező domént/alegysé-a get tartalmazó hibrid fehérjék előállítása; ezek alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata a cellulóz-, a papír- és a textiliparban.
A Hsp70 chaperon rendszer alkalmazása új terápiás eljárások kifejlesztésében és nagy hatékonyságú sejt-biomolekulá ris gyárak előállításában	A Hsp70 chaperon rendszer biokémiai és funkcionális jellemzése; a ko-chaperonok szerepének felderítése; a Hsp70 chaperon komplex hatásmechanizmusának tanulmányozása az apoptózis és a sejt-transzformáció szabályozása során; a Hsp70 amyloidosisban és neurodegeneratív betegségekben játszott szerepének vizsgálata.
Szintetikus SH2-domén tartalmú fehérjemodulok alkalmazása rákos sejtek jellemzésére és a rákkal kapcsolatos fenotípusok azonosítására	Új biotechnológiai eljárások kifejlesztése, amelyek a természetben előforduló fehérjéket ill. fehérje-modulokat (például SH2-domén) alkalmaznak a rákos sejtek proteomikai jellemzéséhez, a rákos fenotípusok azonosításához és a racionális gyógyszertervezéshez. Az SH2-domén kritikus aminosavainak véletlenszerű mutagenezisével előállítható modulok alkalmazásával elméletileg bármely foszfotirozin tartalmú fehérje megköthető és tovább tanulmányozható.
Betegségek jellemzése egyedi sejtek szintjén vizsgált jelátviteli folyamatok alapján	Nanotechnológiai eljárások kifejlesztése és alkalmazása az intracelluláris jelátviteli folyamatok valós idejű megfigyelésére és vizsgálatára egyedi sejtek szintjén. Új nanotechnológiai stratégiák kifejlesztése a jelátviteli útvonalak részletes molekuláris feltérképezésére egészséges és beteg sejteken.
Nano-biotechnológia és orvostudomány	A nano-gyártási eljárások, valamint a sejtek és szövetek nanorészecskék által kiváltott biológiai reakcióinak vizsgálata. Orvosi eszközök prototípusának tervezése, építése és tesztelése nanorészecskék felhasználásával.
Az élesztő sejtfalának alkalmazása antimikrobiális ágensek hatékony teszteléséhez	Az élesztő modellszervezetként való használata patogén és nem patogén gombák sejtfalának moduláris szerkezetét meghatározó kereszt-csatolásos és újramodellezési útvonalak jellemzésében; a sejtfalat gyengítő kezelések hatását kompenzáló mechanizmus meghatározó tényezőinek feltárása, hatékony szűrőtesztek előállítása, új hatásos gombaellenes szerek keresése.

1. táblázat

a különböző tudományterületeket (EC2), de kiemelték azokat, amelyeken a közeljövőben jelentős fejlődés várható. Így a természet- és fizikai tudományok területén a biotechnológiát, ezen belül is a nano-biotechnológiát említették (EC3).

A korábban már említett biochipek mellett a jövőben a nano-biotechnológia további érdekes újításokkal szolgálhat, a gyógyszerek pontos célba juttatását lehetővé tevő rendszerektől kezdve a jelentősen megnövekedett biokompatibilitású beültetett eszközökig, amelyek rendkívüli hatással lehetnek az orvostudományra. A gyógyszerek pontos célba juttatásának elérése a nanotechnológia egyik fontos területe. A gyógyszerek szükségtelenül nagy mennyiségű adagolásának elkerülésére olyan, csak a beteg sejteket vagy szöveteket elérő, az immunrendszer által nem érzékelt készítményekre lenne szükség, amelyek akkor és csak ott hatnak, ahol erre szükség van. Ez újabb lényeges, ugyanakkor nem egyszerűen megoldható kihívást jelent a nanotechnológia területén.

Az új eszközök méreteinek csökkentésével a mai termelési technológiákat új, nanoszintű termelési technológiák váltják fel. Az egyik leglényegesebb feladat a molekulák kívánt funkcióval rendelkező, megszabott konfigurációkba való önszerveződésének elérése. Az önszerveződés számos fogalmat és strukturális komplexitást foglal magába a kristályok növekedésétől a teljes biológiai egységek reprodukciójáig. Bár ezen a területen már jelentős előrehaladást értek el, eddig csak viszonylag egyszerű struktúrákat sikerült előállítani. Az önszerveződés tehát kulcsfontosságú tudományos kihívás az ellenőrzött nanotechnológia kialakításában.

A nano-biotechnológiában a természettől kiváltképp sokat lehet tanulni. A fehérjék, nukleinsavak, szénhidrátok és zsírok felhasználásával a természet több millió éven keresztül fejlesztette ki a nanoléptékű élet eszközeit. Az evolúció termékeinek lemásolása és az ember által alkotott eszközökbe (például molekuláris motorokba és nanogépekbe, fotonikus eszközökbe, vegyi reaktorokba, szivattyúkba és szűrőkbe, stb.) történő beépítése, az egyik legnagyobb interdiszciplináris kihívás napjainkban.

Kulcsszavak: *nanotechnológia, nano-biotechnológia, optikai és pásztázó szondás mikroszkópia, fluoreszcencia spektroszkópia, EU kutatási keretprogramok*

IRODALOM

Ashkin, Art (1997): Optical Trapping and Manipulation of Neutral Particles Using Lasers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **94**, 4853-4860.

Bene László – Fulwyler, Mack J. – Damjanovich Sándor (2000): Detection of Receptor Clustering by Flow Cytometric Fluorescence Anisotropy Measurements. Cytometry. **40**, 292-306.

Betzig, Eric –Trautman, Jay K. (1992): Near-Field Optics: Microscopy, Spectroscopy, and Surface Modification beyond the Diffraction Limit. Science. **257**, 189-195.

Binnig, Gerd – Quate, Calvin F. – Gerber, Christoph (1986): Atomic Force Microscope. Physical Review Letters. **56**, 930-933.

Binnig, Gerd – Rohrer, Heinrich (1982): Scanning Tunnelling Microscopy. Helvetica Physica Acta. **55**, 726-735.

Brock, Roland – Vámosi G. – Vereb G. – Jovin, T. M. (1999): Rapid Characterization of Green Fluorescent Protein Fusion Proteins on the Molecular and Cellular Level by Fluorescence Correlation Microscopy. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **96**, 10123-10128.

Damjanovich Sándor – Bene L. – Matkó J. – Alileche A. – Goldman, C. K. –Sharrow S. – Waldmann, T. A. (1997a): Preassembly of Interleukin 2 (IL-2) Receptor Subunits on Resting Kit 225 K6 T Cells and Their Modulation by IL-2, IL-7, and IL-15: A Fluorescence Resonance Energy Transfer Study. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **94**, 13134-13139.

Damjanovich Sándor – Gáspár R. Jr. – Pieri C. (1997b): Dynamic Receptor Superstructures at the Plasma Membrane. Quarterly Review of Biophysics. **30**, 67-106.

Damjanovich Sándor – Vereb G. – Schaper, A. – Jenei A. – Matkó J. – Starink, J. P. – Fox, G. Q – Arndt-Jovin, D. J. – Jovin, T. M. (1995): Structural Hierarchy in the Clustering of Hla Class I Molecules in the Plasma Membrane of Human Lymphoblastoid Cells. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **92**, 1122-1126.

Ehrenberg, Måns – Rigler, Rudolph (1974): Rotational Brownian Motion and Fluorescence Intensify Fluctuations. Chemical Physics. 4, **3**, 390-401.

Eigen, Manfred – Rigler, Rudolph (1994): Sorting Single Molecules: Application to Diagnostics and Evolutionary Biotechnology. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **91**, 5740-5747.

Förster, Theodor (1948): Zwischenmolekulare Energiewanderung Und Fluoreszenz. Annalen der Physik. **2**, 55-75.

Hinterdorfer, Peter (2002): Molecular Recognition Studies Using the Atomic Force Microscope. Methods in Cell Biology. **68**, 115-139.

Jenei Attila – Varga S. – Bene L. – Mátyus L. – Bodnár A. – Bacsó Z. – Pieri, C. – Gáspár R. Jr. – Farkas T. – Damjanovich S. (1997): HLA Class I and II Antigens Are Partially Co-Clustered in the Plasma Membrane of Human Lymphoblastoid Cells. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **94**, 7269-7274.

Lacoste, Thilo D. – Michalet, X. – Pinaud, F. – Chemla, D. S. – Alivisatos, A. P. – Weiss, S. (2000): Ultra-high-Resolution Multicolor Colocalization of Single Fluorescent Probes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. **97**, 9461-9466.

Magde, Douglas – Elson, Elliot L. – Webb, Watt W. (1974): Fluorescence Correlation Spectroscopy. II. An Experimental Realization. Biopolymers. **13**, 29-61.

Nagy Péter – Jenei A. – Kirsch, A. K. – Szöllősi J. – Damjanovich S. – Jovin, T. M. (1999): Activation-Dependent Clustering of the Erbb2 Receptor Tyrosine Kinase Detected by Scanning Near-Field Optical Microscopy. Journal of Cell Science. **112** (Pt 11), 1733-1741.

Nagy Péter – Vámosi G. – Bodnár A. Lockett, S. J. – Szöllősi J. (1998): Intensity-Based Energy Transfer Measurements in Digital Imaging Microscopy. European Biophysics Journal. **27**, 377-389.

Schwille, Petra – Meyer-Almes, Franz-Josef – Rigler, Rudolp (1997): Dual-Color Fluorescence Cross-Correlation Spectroscopy For Multicomponent Diffusional Analysis in Solution. Biophysical Journal. **72**, 1878-1886.

Szöllősi János – Damjanovich Sándor – Mátyus László (1998): Application of Fluorescence Resonance Energy Transfer in the Clinical Laboratory: Routine and Research. Cytometry. **34**, 159-179.

Tews, K-H. – Inacker, O. – Kuhn H. (1970): Variation of the Luminescence Lifetime of a Molecule Near an Interface Between Differently Polarizable Dielectrics. Nature. **228**, 276-278.

IRODALOM A FÜGGELÉKHEZ

EC 1 (2001) Nanotechnology in the European Research Area, European Commission, Brussels

Benediktsson, Indridi (2002) Cell Factory, Community Funded Projects, European Commission, Brussels

EC 2 (2001) Sustainable Production, Challenges & Objectives for EU Research Policy, Report of the Expert Group on Competitive & Sustainable Production and Related Service Industries in Europe in the Period to 2020, European Commission, Brussels

EC 3 (2002) Workprogramme for Thematic Priority No3 Nanotechnologies, European Commission, Brussels

Tanulmányok

MI MENNYI?[1]

Csörgő Sándor
az MTA levelező tagja,
egyetemi tanár,
SZTE TTK Bolyai Intézet

Rónyai Lajos
az MTA levelező tagja,
egyetemi tanár,
MTA SZTAKI

Ruzsa Imre
az MTA rendes tagja,
egyetemi tanár, MTA Rényi Alfréd
Matematikai Kutató Intézet

A kapitány a gépháznak: *Mennyi?*
Gépház: *Harminc.*
Kapitány: *Mi harminc?*
Gépház: *Mi mennyi?*[2]

Wolfgang Glänzel, Schubert András és Braun Tibor (Glänzel, 2002) tudománymetriai dolgozata összesítő adatsorokat közöl a legtöbbet publikáló harminckét ország 1990 és 1998 közötti tudományos teréséről. Országonként a természettudomány tizenkét területére lebontva meghatározták a tudományos közlemények átlagos hivatkozottságát[3] (MOCR), és ezt összevetették a publikációknak teret adó folyóiratok átlagos hatástényezőjével (MECR). Rangsorokat képeztek a MOCR/MECR hányados értéke alapján. Eszerint a vizsgált összes tudományterület egészét tekintve Magyarország a 23. A részterületeket illetően a hazai idegtudomány (16.) és fizika (17.) helyezése a legjobb, míg a matematika a 28. a sorban.

Mit jelentenek ezek a számok és rangsorok? Értelmezhetők-e úgy, mint a tudományágak országonkénti helyzetét híven tükröző mutatók? Helyes lehet-e őket tudománypolitikai döntések alapjának tekinteni? Az utóbbi két kérdésre egyértelmű NEM a válaszunk. Ezeket az adatokat a jelen formájukban, mindenféle kiegészítés nélkül nem szabad az egyes területek helyzetének értékelésére használni. A következőkben ezt a véleményünket szeretnénk érvekkel és adatokkal alátámasztani. E sorok írói matematikusok, elsősorban a matematika helyzetéről rendelkeznek ismeretekkel, így ezt fogják részletesebben elemezni.

Átlag

Tegyük fel munkahipotézisként, hogy az átlagosan két és fél éven belül megjelenő hivatkozások magas száma azt jelenti, hogy a közlemény jó (bár ez erősen vitatható), a nagy hatástényező pedig azt, hogy a folyóirat jó. Ha akarunk egyáltalán valami értelmet tulajdonítani a (Glänzel, 2002) vizsgálatnak,

[1] Köszönetet mondunk kollégáinknak a sok értékes észrevételért. A Matematikai Tudományok Osztálya a cikk tartalmával foglalkozott, főbb megállapításaival egyetértett, az írás nyilvánosságra hozatalát javasolta.

[2] Ismert pesti vicc. A motívum megjelenik Örkény István *A termelés zavartalanul folyik* c. egypercesében is.

[3] Módszerük kismértékben eltér az Institute for Scientific Information (ISI) által használatostól; egy közleményre a megjelenés esztendejével kezdődően három, és nem két év hivatkozásait vették figyelembe. Elemzésük az ISI által kiadott *Science Citation Index* (SCI) adatbázisra épül, az adatok „tisztítására" saját eljárásukat alkalmazták.

akkor nem kerülhető meg egy ilyenfajta feltételezés. El lehetne tűnődni azon is, hogy miért éppen a hányados a rangsorok alapja, és miért nem mondjuk a MOCR érték, de ez az összképen nem változtat sokat. Hangsúlyozzuk: munkahipotézisünk nem a hivatkozások általában magas száma és a közlemény minősége közötti összefüggésre (ami még mindig eléggé vitatható volna), hanem az idézett dolgozatot követve csak a három éven belül megjelenő hivatkozásokra vonatkozik. Alább látni fogjuk, hogy a matematika területén a rövid- illetve a hosszútávú idézettség egészen eltérő képet is mutathat: egy dolgozat idővel sűrűn idézetté válhat annak ellenére, hogy az első három évben alig hivatkoztak rá.

Feltételezésünk alapján az a következtetés vonható le, hogy a listában élen álló országok, mondjuk Svájc, Finnország vagy Dánia kutatói átlagosan jobb azonnali hatású cikkeket írnak, és jobb helyen jelentetik meg őket, mint a hátul álló országok, India, Kína vagy Magyarország. Mennyiségről itt nincs szó; az egyetlen mennyiségi szempont, az ország teljes publikációszáma, csak a vizsgált országok kiválasztásánál szerepelt.

A gyengébb helyezés két dolgot jelenthet: – vagy kevés jó cikket írunk, és ez baj – vagy sok jó cikket írunk, de az átlagot rontják a szerényebb közlemények, ami nem akkora baj.

Ezt megvilágítandó képzeljünk el két országot: az elsőben írnak száz sokat idézett cikket, míg a másikban ezalatt száz sokat idézettet és száz keveset idézettet. A versenyt az első ország nyeri, pedig a másik száz cikk is hozzájárult a tudományhoz, noha talán kevesebbet, mint a száz első. Ha most a második hipotetikus ország kétszer akkora, mint az első, akkor teljesítménye gyengébbnek tekinthető. Ha viszont ugyanakkora, akkor annyit állapíthatunk meg, hogy a minőségi tudomány mellett jelentős mennyiségű középszerű tudomány is van. Csak a sajátos viszonyok ismeretében lehet kideríteni egy ilyen jelenség okát, és eldönteni, hogy kívánatos vagy káros-e.

E két lehetőség közül úgy tudnánk választani, ha ismernénk a tudományágon belüli publikációs számokat, és ezeket viszonyítanánk az ország nagyságát jellemző adatokhoz, mint: lélekszám, nemzeti jövedelem, a tudományra fordított költségek, a diplomások száma, stb.

Két okot említünk, ami a helyezéssel kapcsolatban lehet.

Egyik a tudományos piramis szélessége, vagyis hogy egy vezető kutatóra hány gyengébb vagy kezdő kutató jut. Ez önmagában se nem jó, se nem rossz, hanem nyilván az oktatás és kutatás sajátosságait tükrözi. Úgy képzeljük, hogy olyan országokban, ahol a felsőoktatásban résztvevők száma évtizedek óta magas, és ezért lényegében stagnál, ez a piramis szűkebb, mint ahol az egyetemisták száma és ezzel összefüggésben az egyetemi oktatók száma is erősebben nő. Ez egybevág azzal, hogy a rangsor élén olyan országokat találunk, mint a skandináv országok, Svájc és Hollandia, míg a végén olyanokat, mint India, Kína, Argentína. (1990 és 1998 között, tehát a vizsgálat időszakában jelentősen nőtt a hazai felsőoktatásban matematikát oktatók száma.)

Az emigráció szintén befolyásolja a helyzetet, ami köztudomásúan leginkább a befutott tudósokat és a legjobb fiatalokat vonzza a szegény országokból a gazdagokba. A rangsor sereghajtói, India és Kína nagyban hozzájárulnak az Egyesült Államok tudományos teljesítményéhez.

Másik ok a publikációs nyomás. Elképzelhető, hogy Indiában és Magyarországon erős nyomás nehezedik a kutatókra, hogy minél többet publikáljanak, ezért sok gyenge cikket is megjelentetnek, míg mondjuk Dániában vagy Svájcban ilyen nyomás nincs. Az kétségtelen, hogy nálunk létezik ilyen nyomás.

Összességében elmondhatjuk, hogy a (Glänzel, 2002) dolgozat adatsorai önmagukban valamiféle átlagot érintő semleges

tényezők, csak más adatokkal kiegészítve szolgálhatnának reális értékelés alapjául.

Élvonal

Úgy gondoljuk, hogy a tudományos teljesítmény megítélésében az átlagnál, az átlagosnál fontosabbak a kiemelkedő eredmények, teljesítmények. A kiugró eredmények azok, amelyek elsődlegesen meghatározzák a tudományág fejlődését, ezek a haladás mérföldkövei. A hivatkozott vizsgálat ilyen természetű adatokat nem tartalmaz.

Az élvonalbeli matematikát lehetetlen az első három év citációi alapján azonosítani. Tekintsük például Komlós János, Major Péter és Tusnády Gábor nevezetes cikkét, a modern valószínűségelmélet meghatározó jelentőségű dolgozatát, amelynek I. és II. része 1975-ben és 1976-ban jelent meg. A kettőre összesen 513 hivatkozást tart számon jelenleg az SCI, de ebből a megfelelő első három évre mindössze tizenkettő esik, kivétel nélkül olyan szerzőktől, akik jelen voltak az eredmények bejelentésénél, egy 1974-ben tartott konferencián. Második példának vegyük Szemerédi Endre ugyancsak 1975-ben megjelent híres munkáját az egészekből álló halmazokban levő számtani sorozatokról. Erre az SCI összesen százharminchat hivatkozást ismer, melyekből csak öt jelent meg 1975 és 1977 között. Hogy ne csak magyar példákat hozzunk, a harmadik legyen Louis de Branges nevezetes, a Bieberbach-sejtést bizonyító cikke 1985-ből: erre összesen kilencvennyolc hivatkozás van eddig, ám ezekből mindössze tizenhat származik az 1985-1987. évekből. Végül vegyük Andrew Wiles korszakos jelentőségű dolgozatát 1995-ből, a Fermat-sejtés bizonyításával. Ennek a megjelenését többéves óriási publicitás előzte meg, és azóta három népszerűsítő könyv jelent meg a szerzőről és a probléma megoldásáról (egy magyar fordításban is). A szerzőről a BBC portréfilmet sugárzott, arcképét a *The New York Times* kétszer hozta a címlapján, s az esemény két modern opera megszületését is kiváltotta. A cikkre eddig összesen csupán száznegyvenkét hivatkozást dokumentált az SCI, ezek közül csak harminchat esik az első három évre.

Alábbiakban a matematikára vonatkozóan ismertetünk pár olyan mutatót, amelyek a kiemelkedő teljesítményekre érzékenyek – mind Magyarország, mind más országok esetében. Hogy az Olvasónak legyen viszonyítási alapja, itt közöljük a (Glänzel, 2002) dolgozatból a matematikára vonatkozó országsorrendet: az első Dánia, majd Nagy-Britannia, Svájc, Belgium, Ausztria, Norvégia, Hollandia, Amerikai Egyesült Államok, Finnország, Svédország, Franciaország, Németország, Spanyolország, Izrael, Ukrajna, Kanada, Olaszország, Oroszország, Ausztrália, Csehország, Japán, Új-Zéland, Dél-afrikai Köztársaság, Brazília, Görögország, Lengyelország, Kína, MAGYARORSZÁG, Koreai Köztársaság, Tajvan, Argentína, India következik.

A tudományág jelentős seregszemléi a nagy matematikai kongresszusok. A meghívott előadók előadásaiból kirajzolódnak a fontosabb irányzatok, megjelennek azok az eredmények, amelyeket a szakma legtöbbre értékel. A meghívott előadók mindenkor a legjobbak közül kerülnek ki.

Az Európai Matematikai Unió eddig három nagy kongresszust rendezett: 1992-ben Párizs, 1996-ban Budapest, 2000-ben Barcelona adott otthont az Európai Matematikai Kongresszusnak. A következő adatsor a három Kongresszus meghívott előadóinak országok szerinti eloszlását mutatja. A konferenciakötetben feltüntetett affiliáció(k) alapján végeztük el a besorolást, ahogy Glänzelék is tették – például Jan Nekovárt Csehországnál és az Egyesült Államoknál is figyelembe vettük. Az első három szám az egyes kongresszusokon az előadók száma az illető országból, a sor végén az összeget tüntettük fel.

Magyarország szereplése imponáló még akkor is, ha a budapesti kongresszus kapcsán a hazai pálya előnyét is számításba vesszük.

Ország	Párizs	Budapest	Barcelona	Össz.
Amerikai Egyesült Államok	6	4	4	14
Ausztria	0	0	1	1
Belgium	0	2	1	3
Bulgária	1	0	0	1
Csehország	1	1	0	2
Dánia	1	1	2	4
Finnország	1	2	1	4
Franciaország	5	2	7	14
Hollandia	1	0	3	4
Izrael	0	3	0	3
Kanada	0	1	0	1
Lengyelország	1	2	0	3
MAGYARORSZÁG	2	4	1	7
Nagy Britannia	6	2	5	13
Németország	6	6	6	18
Norvégia	1	1	0	2
Olaszország	4	4	3	11
Oroszország	4	4	2	10
Spanyolország	0	1	3	4
Svájc	2	1	0	3
Svédország	1	2	2	5

1. táblázat

A Wolf-díj (Wolf; www) egyike a legnagyobb presztízsű tudományos és művészeti kitüntetéseknek. 1978-tól évente ítélik oda a mezőgazdaság, a fizika, a kémia, a matematika, az orvostudomány és a művészetek[4] legjelesebb képviselőinek. Az orvos és fizikus díjazottak névsorát böngészve kitűnik, hogy közülük sokan később elnyerték a Nobel-díjat.

Amerikai Egyesült Államok	20
Franciaország	6
Izrael	2
Japán	3
MAGYARORSZÁG	2
Nagy-Britannia	1
Németország	2
Olaszország	1
Oroszország/Szovjetunió	5
Svájc	1
Svédország	2

2. táblázat

A következő táblázat a matematikai Wolf-díjak országok szerinti eloszlását tartalmazza. A több affiliációval rendelkező kutatókat ezúttal is számításba vettük az összes érintett országnál.

Magyarország itt abszolút értelemben is igen előkelő helyet foglal el. A lélekszámhoz viszonyított, vagyis skálainvariáns helyezése pedig egészen kiemelkedő. Hasonló képet mutatnak a (Braun, 2003) adatsorai is. Ebben a vizsgálatban több nemzetközi matematikai díj alapján készítettek összesítő rangsorokat. Itt a 3. és 4. táblázat szerint Magyarország a hetedik helyen van a sorban. Csupán az Egyesült Államok, Franciaország, az Egyesült Királyság, Kanada, Oroszország és Németország áll előttünk.

Az Európai Közösség 1999-ben pályázatot hirdetett a csatlakozásra váró országok

[4] Évenként váltva jutalmazzák az építészet, a zene, a festészet és a szobrászat kiválóságait.

tudós közösségei számára. A kezdeményezés fő célja a legjobb tudományos intézmények támogatása, Kiválósági Központként való elismerése volt (további részleteket illetően lásd: Európai Közösség, www). A tizenkét tagjelölt országból 185 pályázat érkezett be, ezek közül a rendkívül alapos bírálati eljárás végén mindössze harmincnégy nyerte el a komoly anyagi támogatással járó Kiválósági Központ címet. A hazai tudomány fényes sikere, hogy a harmincnégy nyertes közé hat magyar intézmény került (a Budapest Kollégium, és öt akadémiai intézet: a Kísérleti Orvostudományi Kutató Intézet, a Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, a Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI), a Szegedi Biológiai Központ, valamint a Szilárdtest Fizikai és Optikai Kutatóintézet).

A matematikát és számítástudományt illetően még kedvezőbb az arány: a hat erre a területre (is) eső Kiválósági Központ közül kettő magyar (MTA Rényi Intézet, MTA SZTAKI). Egyedül Magyarország van abban a helyzetben, hogy ***két intézményét is*** támogatásra méltónak találták ebben a kategóriában!

Egy szakterületen a nemzetközi megítélésünket, a szakmai közösség rólunk formált véleményét tükrözi, hogy milyen a képviseletünk a megfelelő világszövetségben. A matematikusokat tömörítő világszervezetet, az IMU-t magyar nevén Nemzetközi Matematikai Unióként ismerik. A tagországokat öt csoportba sorolták, az *i.* csoportban levő országoknak *i* szavazatuk van az IMU közgyűlésén ($1 \le i \le 5$). A besorolás alapja elsősorban az országok mérete és szakmai súlya.[5] Magyarország a 3. csoportba került, tehát három szavazattal rendelkezünk.

Az 1-2. csoportokban negyvenöt ország található. A magasabb sorszámúak összetétele így alakult: 3. csoport: Ausztrália, Belgium, Brazília, India, Lengyelország, MAGYARORSZÁG, Spanyolország. 4. csoport: Hollandia, Svájc, Svédország. 5. csoport: Amerikai Egyesült Államok, Franciaország, Izrael, Japán, Kanada, Kína, Nagy-Britannia, Németország, Olaszország, Oroszország.

Itt is elmondhatjuk, hogy önmagában is igen előnyös a helyzetünk, és különösen jónak mondható, ha ezeket az adatokat az országok méretéhez viszonyítva szemléljük.

Hangot adtunk a hivatkozási mutatók értelmével kapcsolatos kétségeinknek. Végezetül, a hivatkozások híveire is gondolva, mégis egy ilyen jellegű számsorra hívjuk fel a figyelmet. Az ISI nyilvántartást vezet a természettudományok kiemelkedő idézettségű kutatóiról (ISI, www). Az abban szereplő[6] 232 matematikus országok szerinti eloszlása így fest:

Amerikai Egyesült Államok	160
Franciaország	14
Anglia	13
Izrael	6
Ausztrália	5
Németország	5
Hollandia	4
MAGYARORSZÁG	3
Dánia	3
Japán	3
Kanada	3
Olaszország	3
Spanyolország	2
Svájc	2
Belgium	1
Görögország	1
India	1
Skócia	1
Szingapur	1
Tajvan	1

3. táblázat

A listákat böngészve összesen öt magyar affiliációjú kutatót találtunk. A három mate-

[5] A pontosság kedvéért megemlítjük, hogy a magasabb sorszámú osztályokban nagyobb a tagdíj. Egyes országok azért maradtak alsóbb osztályban, mert nem kívánnak több tagdíjat fizetni.

[6] Az adatbázis 2003. márciusi állapota szerint.

matikus mellett az idegtudomány két képviselője, Freund Tamás és Palkovits Miklós került be a kiemelkedő idézettségű tudósok körébe. A hazai matematika tehát ebből a szemszögből is kedvező képet mutat.

Az írásunkban szemügyre vett adatsorok alapján nyilvánvaló, hogy a matematikai kutatás élvonalát illetően sokkal jobb a helyzetünk, mint azt az idézett vizsgálat adatai sugallják. Valószínű, hogy hasonló a helyzet több más tudományterület esetében is. Ennek az alaposabb vizsgálata talán nem lenne tanulságok nélkül való.

Mindenkit óva intenénk a scientometriai adatok és rangsorok kritika nélküli felhasználásától. Az egyes tudományterületek sajátosságai, az eltérő publikációs és hivatkozási szokások jóval árnyaltabb megközelítést tesznek szükségessé.

Kulcsszavak: *tudománymetria, hivatkozás, tudományos díj*

IRODALOM, INTERNET

Glänzel, Wolfgang – Schubert András – Braun Tibor (2002): A Relational Charting Approach to the World of Basic Research in Twelve Science Fields at the End of the Second Millennium. Scientometrics. 55, **3** 335-348.

Braun Tibor – Szabadi-Peresztegi Zsuzsa – Kovács-Németh Éva (2003): About Abels and Similar International Awards for Ranked Lists of Awardees as Science Indicators of National Merit in Mathematics. Scientometrics, Vol. 56. No. 2 161-168.

Az ISI adattára a kiemelkedő idézettségű kutatókról: http://www.isihighlycited.com

A Wolf-díj honlapja: http://www.aquanet.co.il/wolf/wolfpriz.html

Az Európai Közösség kutatás-fejlesztési információs honlapja: http://www.cordis.lu/inco2/

EGGYEL KEVESEBB...

Wolfgang Glänzel[1]
PhD, ügyvivő szakértő, MTA Kutatásszervezési Intézet – glanzw@mail.iif.hu

Schubert András
ügyvivő szakértő, MTA Kutatásszervezési Intézet – schuba@mail.iif.hu

Braun Tibor
az MTA doktora, kutatócsoport-vezető, főtitkári tanácsadó, MTA Kutatásszervezési Intézet, címzetes egyetemi tanár, ELTE – braun@mail.iif.hu

Kennedy elnök a feleségéhez (reggel): *Ma látogat meg a gerincsérülésemet kezelõ orvosom.*
Mrs. Kennedy (este): *Volt nálad az orvos?*
Kennedy: *Volt, de sajnos, ahányszor meglátogat, mindig úgy érzem, hogy a szükségesnél eggyel kevesebb könyvet olvasott el.*[2]

Csörgő Sándor, Rónyai Lajos és Ruzsa Imre (CRR) cikkét érdeklődéssel olvastuk, és köszönjük érdekes észrevételeiket (Csörgő et al., 2003). Az alábbiakban néhány kiegészítő, illetve pontosító megjegyzést fűznénk dolgozatukhoz. Ugyanis valószínűnek tartjuk, hogyha az említett szerzők elolvasták volna a kérdéssel foglalkozó két másik dolgozatunkat (Braun et al., 2002; Braun et al, 2003), jobban átlátták volna szándékainkat és törekvéseinket.

Hangsúlyozni szeretnénk, hogy a Braun et al., 2002-es hivatkozásban nemcsak a hazai matematika, hanem a teljes természettudományi alapkutatás nemzetközi *összehasonlító* helyzetével foglalkoztunk.

Az értékeléseket csak az *1990-1998-as idõszakra* vonatkoztatva, a természettudomány egészére, (pontosabban arra a területre, amelyet az angol nyelvű szóhasználat *science* néven említ), valamint a következő szakterületekre végeztük el:

Klinikai orvostudomány (MED)
Orvosbiológia (BRE)
Biológia (BIO)
Kémia (CHE)
Fizika (PHY)
Matematika (MAT)
Mérnöki tudományok (ENG)
Föld- és űrtudományok (ESS)

Az eredmények zöme – főleg a fajlagosított adatok – az országok *átlagaira* vonatkoznak, de néhány esetben összesített adatokkal is dolgoztunk. Bár az országok gazdasági, ipari és más statisztikai adatai általában átlagokkal számolnak, meg kell jegyeznünk, hogy a tudományos teljesítmények mérésénél az átlagos adatok bizonyos mértékben megtévesztők lehetnek. Ez a témával kapcsolatos eloszlásokból adódik, ugyanis a tudományos teljesítményt tekintve az eloszlások nem szabályosak, hanem ferde jellegűek. Más szavakkal ez azt jelenti, hogy a tudományos teljesítményeknél mindig kevesen (országok, intézetek, egyének, stb.) teljesítenek sokat és sokan keveset. *Ennek a törvényszerûségnek lehet a következménye, hogy a ferde*

[1] Jelenleg a Leuveni Egyetem (Belgium) vendégprofesszora
[2] Ismert Egyesült Államok-beli történet

eloszlás csúcsa beleolvad az alacsonyabb aritmetikai átlagba.

Lineáris rangsorokat a várt átlagos idézések (VÁI)[3] alapján is állítottunk össze. Ezt az egy bizonyos ország által publikálásra igénybe vett folyóiratok cikkeinek idézettségi hatástényezői (impakt faktorai) átlagának alapján végeztük. Ezzel párhuzamosan rangsort készítettünk az országok által publikált mért (valós) átlagos idézetek (MÁI) alapján is. Persze lehet ún. hatástényezőket (mint azt CRR említik) hosszabb időszakokra is számolni, megemlítve a matematikai idézettség esetleg más területeknél lassúbb kumulálódását. Ez, összehasonlító vizsgálatok esetében, azonban így van más országok esetében is, ezért az országok közti arányok nem változnának. A VÁI és MÁI értékeit egymáshoz viszonyítva kiszámítottuk az országok relatív idézettségi hatását (RIH = MÁI/VÁI), ami képet ad arról, hogy az illető országok cikkeinek milyen a relatív idézettségi hatása azokban a folyóiratokban, amelyekben kutatói publikáltak, az abban publikáló más országbeli kutatók világátlagához viszonyítva. Amennyiben RIH = 1,00 az illető ország cikkeinek átlagos idézettsége megegyezik a világátlaggal. Ha egynél kisebb vagy nagyobb, akkor az idézettség is ennél kisebb vagy nagyobb.

Fentiekhez hozzá kell tenni: a VÁI értékei tulajdonképpen azt mutatják, hogy egy bizonyos ország kutatói milyen idézettségi hatású (impakt faktorú) folyóiratokban publikálják cikkeiket. Minél nagyobb ez az érték, annál ismertebbek és elismertebbek a publikálásra igénybe vett folyóiratok (Braun et al., 2002).

Itt csak a hazai matematika rangsorbeli helyezésére térünk ki: Matematika: MÁI alapján= 33., VÁI alapján= 38., RIH alapján= 30.

„E rangsorok jobb és használhatóbb értelmezéséhez dolgoztuk ki a relatív idézettségi hatást (RIH) és a kétdimenziós vonatkozó diagramot (KVD) bemutató ábrákat. A diagram A-tól F-ig terjedő betűvel jelzett zónákra oszlik" (Braun et al., 2002).

A KVD diagramok bemutatására lásd a hivatkozást: Braun et al., 2002. A diagramokban való hazai helyzetet az ***1. táblázat*** szemlélteti.

„A D zónában szereplő országok kutatói a világátlagnál alacsonyabb idézettségű folyóiratokban publikálnak, a cikkek idézettsége a világátlagnál és az 1,00-es RIH értéknél alacsonyabb.

Tudatában vagyunk annak, hogy Magyarország helyzetét a természettudományi alapkutatás világában számos módszerrel lehet vizsgálni. *Mi itt ezek közül csak az alapkutatást nyilvánosan és mérhetõen bemutató publikációs tevékenységet elemeztük.* Tettük ezt annak alapján, hogy az alapkutatás leghűebb tükrének a tudományos szakirodalmat tekintik, ezen belül elsősorban a tudomány fejlődési, haladási frontját képviselő folyóirat-irodalmat.

A különböző világranglistákon elért helyezéseink alapján állíthatjuk, hogy jelenleg Magyarország a szakterülettől és attól függően, hogy a mennyiségi vagy a minőségi tényezőket tekintjük-e, a világ felső középmezőnyének valamelyik helyét foglalja el.

„Magyarországon számos szakterületen és tématerületen mutathatók ki világviszonylatban is kiemelkedõ eredmények, ezek azonban ebben a dolgozatban elemzett, országos összesített és átlagos adatokban – mint már említettük – *nem jelentkezhettek"* (Braun et al., 2002).

Ezért külön köszönjük CRR-nek (Csörgő et al., 2003), hogy a hazai matematika esetében ezeket kiemelten említették. A bevezetőben jelzett hivatkozásban (Braun et al, 2003) a matematikai alapkutatás helyzetét vizsgáltuk nemzetközi összeállításban, egy új mutatószám, a nemzetközi matematikai díjak számának vonatkozásában, 1868-2000 időszakban.

A ***2.*** és ***3. táblázat*** mutatja be a magyar matematika helyezését. A táblázatok eredményei önmagukért beszélnek.

[3] Az angol nyelvű megfelelők: VÁI = MECR; MÁI = MOCR; RIH = RCR; KVD = Relational Chart (RC)

Szakterület	Zóna
Természettudományok (együtt)	D
Klinikai orvostudomány (MED)	B
Orvosbiológia (BRE)	D
Biológia (BIO)	D
Kémia (CHE)	D
Fizika (PHY)	C
Matematika (MAT)	D
Mérnöki tudományok (ENG)	D
Föld- és űrtudományok (ESS)	D

1. táblázat • Magyarország helyzete a természettudományok KVD diagramján

	Ország	Díjazottak	
		száma	aránya
1	USA	17	48,6
2	Franciaország	11,4	4
3	Németország	2	5,7
4	Japán	2	5,7
5	Oroszország	2	5,7
6	Svédország	2	5,7
7	Egyesült Királyság	1	2,9
8	**Magyarország**	**1**	**2,9**
9	Izrael	1	2,9
10	Olaszország	1	2,9
11	Svájc	1	2,9
12	Ukrajna	1	2,9

2. táblázat • A matematikai Wolf-díj díjazottjai, 1978-1999

Mint látható, más volt a helyzet az 1968–2000 és 1978–1999 időszakokban, és megint más az 1990–1998 periódusban.

A tudománymetriai vizsgálatokat

- szerkezeti,
- dinamikai és
- értékelő

kategóriákba sorolhatjuk.

A szerkezeti tudománymetria a tudományos közösségek, dokumentumhalmazok, fogalomrendszerek szerkezetének feltérképezésével foglalkozik. Módszerei között találjuk a gráfelméletet, a hálózatelemzést vagy a klaszterelemzést.

A dinamikai tudománymetria a vizsgált objektumok (szerzők, publikációk, idézetek, stb.) mennyiségi jellemzőinek térbeli és időbeli viselkedését követi determinisztikus és sztochasztikus modellek vagy számítógépes szimulációk segítségével.

Az értékelő tudománymetria a tudományos kutatás résztvevőire (földrajzi egységek, intézmények, kiadók, folyóiratok, kutatócsoportok és egyének) tesz értékelő megállapításokat. Bár az értékelő tudománymetria a tudománymetria egészének csak egy szűk alterülete, a körülötte gyakran felizzó heves viták meghatározó szerepet játszanak az egész területen folyó kutatási, elemzési tevékenység megítélésében. Az értékelések három szintre vonatkozhatnak:

- makroszint (például országok, szakterületek),
- mezoszint (például intézmények, folyóiratok) és
- mikroszint (kis csoportok, egyének).

Felülről lefelé haladva az értékelések megbízhatósága nyilvánvalóan csökken, míg tudománypolitikai és kutatásirányítási jelentőségük növekszik. A tudománypolitika és kutatásirányítás döntéshozóira hárul a felelősség, hogy a két ellentmondó tendencia között az egyensúlyt megtalálják. Egy alapvető irányelv: a tudománymetriai módszereket antidiagnosztikai eszközként kell használni, vagyis nem a kóros jelenségek kimutatására (ami a diagnosztikai használat lenne), hanem az egészség tüneteinek jelzésére. Más szóval: a tudománymetriai (publikációkon és idézeteken alapuló) érdemeket mindig érdemes jutalmazni, míg hiányukat – más mutatók hiányában – nem szabad büntetni.

A mikroszinttel (egyéni kutatók) kapcsolatos reményeinkkel szeretnénk e választ zárni. Persze nem feltétlenül szükséges és egyeseknek hála, nem is kötelező, de talán érdemes elgondolkozni azon, hogy szerény vizsgálataink eredményei nem válnának-e hasznára kutatóink publikációs stratégiájának az eddiginél még jobb megválasztásában.

IRODALOM

Csörgő Sándor – Rónyai Lajos – Ruzsa Imre: Mi mennyi? Magyar Tudomány. 2003/9

Braun Tibor – Glänzel, Wolfgang – Némethné Kovács Éva – Pereszteginé Szabadi Zsuzsa (2002): Magyarország helyzete a természettudományi alapkutatás világában. Tudománymetriai tájkép a második évezred végén. Magyar Tudomány. **7**. 935-945.

Braun Tibor – Szabadi–Peresztegi Zsuzsa – Kovács–Németh Éva (2003): About Abels and Similar International Awards for Ranked Lists of Awardees as Science Indicators of National Merit in Mathematics, Scientometrics. 56. **2**. 161-168.

NEUROIMMUNOLÓGIAI BETEGSÉGEK KORSZERÛ DIAGNOSZTIKÁJA ÉS KEZELÉSE

Komoly Sámuel
az MTA doktora, Jahn Ferenc Dél-pesti Kórház Neurológiai Osztály,
Neuroimmunológiai Nemzeti Központ – komoly@axelero.hu

A sclerosis multiplex

Augustus Frederic d'Esté, III. György angol király hatodik fia 1822-ben kezdte írni naplóját, jól olvasható tiszta kézírással. Egy kanyaró utáni lábadozás időszakában rögzítette azokat a jelenségeket, amelyek egyre jobban aggasztották. Huszonnyolc éves volt ekkor. Először átmeneti látásromlást panaszolt, majd homályos látásról számolt be. Később heteken keresztül gyengének érezte magát, lábai zsibbadtak, gyakran elesett. Évekkel később Augustus Frederic vizelési zavarokról panaszkodott naplójában, hasbőrének zsibbadását is említi, lábai megbénultak. Állapota évről évre romlott. 1848-ban írása kézremegése miatt már alig olvasható, mindkét keze gyengévé vált, a herceg néhány hét múlva, huszonhat évvel betegségének kezdete után meghalt.

Augustus Frederic naplója a sclerosis multiplex (SM) egyik első részletes leírása. A betegség első orvosi leírása Jean-Martin Charcot-tól (1825–1893), korának leghíresebb francia neurológusától származik, aki Augustus Frederic halála után húsz évvel, 1868-ban tette közzé megfigyeléseit. Egy Robert Carswell (1793-1857) nevű angol orvos által készített anatómiai rajzon már jól felismerhetők a betegségre jellemző, szabad szemmel is megfigyelhető plakkok. Ezek az idegrendszerben sok helyen láthatók (multiplexek), tapintásuk a normál agyszöveténél keményebb (sclerosis) – innen ered a betegség neve: sclerosis multiplex.

Az SM fiatal felnőttkorban a kaukázusi rasszban, a mérsékelt égövön, az idegrendszeri traumás sérülések, illetve az epilepszia után a leggyakoribb neurológiai megbetegedés. A Sclerosis Multiplex Társaságok Nemzetközi Szövetségének becslése szerint a Földön kétmillió ember szenved SM-ben, hazánkban 6-8 ezer beteggel számolhatunk.

Az SM tüneteinek patológiai háttere

A betegség a központi idegrendszert, azon belül döntően annak fehérállományát károsítja. Szövettani vizsgálattal az erek körül az immunrendszer aktivitására utaló limfocitás-plazmasejtes beszűrődés, valamint az idegpályák szigetelését biztosító specializálódott sejtmembrán, a mielin pusztulása mutatható ki. Ezeket a demielinizálódott területeket plakknak nevezik. A betegség klinikai tüneteinek közvetlen oka a demielinizáció (szigetelés-vesztés) következtében kialakuló ingervezetési zárlat, amit a szakirodalom kondukciós blokknak nevez. Profán hasonlatot használva, az SM-ben arról van szó, hogy a világ általunk ismert legcsodálatosabb komputere, az emberi agy, primitív „hardware"-hibák miatt nem működik megfelelően. Szemben a korábbi évtizedekben uralkodó dogmákkal, ma már tudjuk, hogy az agyban is vannak regenerációs folyamatok, a mielint fenntartó oligodendroglia sejtek képesek megújulásra (Komoly et al., 1992). Ez az SM-ben azt jelenti, hogy amíg az idegsejtek tengelyfonalai épek, addig a szigetelés újraépü-

lése (remielinizáció) a tünetek megszűnéséhez vezet. Sajnos a betegség évei alatt az agy remielinizációs kapacitása fokozatosan kimerül, a tengelyfonalak (axonok) pusztulása is megkezdődik, ami visszafordíthatatlanná teszi a klinikai tüneteket (Lovas et al., 2000).

Az SM etiológiája, epidemiológiája, genetikája

A betegség eredete ismeretlen. A tankönyvek általában autoimmun betegségként említik, azonban tény, hogy SM-sepcifikus antigént, autoimmun mechanizmust mind a mai napig nem írtak le. Az autoimmun elmélet a patológiai megfigyeléseken túl azokon az állatkísérleteken alapul, amelyekben igazolták, hogy agy-, illetve gerincvelő homogenizátummal történő immunizációval SM-re emlékeztető, kísérletes allergiás (autoimmun) agy-gerincvelő gyulladást lehet előidézni.

A feltételezhető autoimmun mechanizmusok mellett a betegség kialakulásában környezeti és genetikai tényezők is szerepet játszanak. Környezeti tényezők szerepére utal, hogy a betegség előfordulása az Egyenlítőtől az Északi- és Déli-sarkvidék felé haladva növekszik. Az Egyenlítő vidékén az SM ismeretlen, gyakorisága Izraelben megközelítően 20/100 ezer, a 45. szélességi fok magasságában 60-70/100 ezer, a skandináv országokban 100-120/100 ezer. Bencsik és munkatársai Szegeden a prevalenciát 65/100 ezernek, az évente diagnosztizált új esetek számát (incidencia) 7/100 ezer/évnek találták. Ezek az adatok megfelelnek a hasonló szélességi fokon élő más európai populációkban végzett vizsgálatok eredményének (Bencsik et al., 1998).

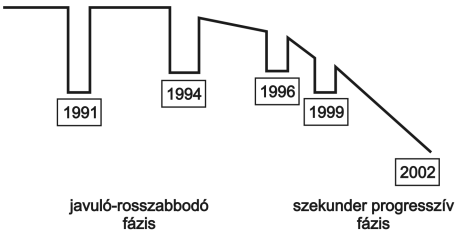
A betegség keletkezésében nemhez kötött ismeretlen tényezőt valószínűsít az a tény, hogy a betegség nőkben megközelítően kétszer gyakrabban fordul elő, mint férfiakban. Genetikai tényezők fontosságára utalnak azok a megfigyelések is, melyek szerint a betegség gyakorisága a különböző rasszokban eltérő. Leggyakrabban a kaukázusi rasszhoz tartozók betegszenek meg SM-ben. Sokkal ritkábban alakul ki a betegség a fehérekkel azonos területen lakó feketék, maorik, cigányok között. A genetikai tényezők nem abszolút meghatározóak, hiszen az egypetéjű ikerpárok esetében is csak az esetek 30 %-ában betegszik meg mind a két iker.

Az SM tünetei és lefolyása

A betegségről a laikusok, de a betegséggel közvetlenül nem foglalkozó orvosok körében is a valóságnál sötétebb kép él: sokszor az SM-mel kapcsolatos első asszociáció a tolókocsi. Szerencsére ez a pesszimista nézet nem igaz. Az összes SM-es beteg legalább 30-40 %-ában, tehát szinte minden második esetben, az SM enyhén zajlik. Ez azt jelenti, hogy ezek a betegek 10-15 év kórtörténet után is csak mérsékelten mozgáskorlátozottak, könnyű fizikai terheléssel járó állást be tudnak tölteni. 10 %-ban a betegség olyan enyhén zajlik, hogy akár harminc év kórtörténet után sem alakul ki rokkantság. Sajnos az esetek 10-20 %-ban az SM gyors lefolyású, azaz egy-két éven belül tolószékhez, ágyhoz kötötté válnak ezek a betegek.

A betegség első tünete típusos esetben a 20-40. életév között jelenik meg, gyermekkorban vagy ötven év felett igen ritkán kezdődik. Bármilyen központi idegrendszeri tünettel indulhat a betegség, ez lehet látásromlás (látóideggyulladás), szédülés, zsibbadás, kettős látás, izomgyengeség, stb. Az SM első szakaszában jellemző, hogy a rosszabbodásokat javulások követik. A jellemzően néhány napig rosszabbodó tünetek kezelés mellett vagy anélkül, néhány hét alatt spontán megszűnhetnek. Hosszabb-rövidebb tünetmentes periódus után azonban a korábbi tünet visszatérhet vagy újabb tünet jelenik meg, ami szintén elmúlhat. Az egyes rosszabbodások között eltelő idő betegenként

nagy különbséget mutat. Ez a relapszusokkal, remissziókkal jellemezhető periódus néhány éven át, a betegek egy részében akár tíz–húsz–harminc éven keresztül tarthat, majd az esetek többségében visszaesések többé nem jelentkeznek, a beteg állapota lassan, egyenletesen rosszabbodik: ez a betegségnek az ún. szekunder progresszív fázisa *(1. ábra).*



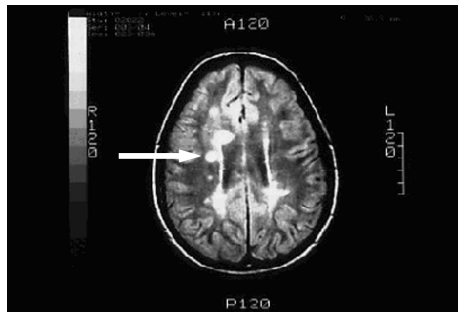
1. ábra • Visszaeső-javuló, majd másodlagosan rosszabbodó sclerosis multiplex lefolyásának sémás illusztrációja. Ilyen lefolyás jellemzi az összes beteg 75-80 %-át (a dátumok a rosszabbodás évét jelzik).

Az utóbbi évtizedben több országban, nagyszámú beteg kórtörténetének elemzése alapján bizonyítottá vált (szemben a korábbi évtizedekben uralkodó téves felfogással), hogy a terhességnek és a szülésnek nincs negatív hatása az SM lefolyására. Legújabb vizsgálatok arra is utalnak, hogy a terhesség alatt a visszaesések száma csökken, az MRI eltérések mérséklődnek. A hormonális fogamzásgátlásnak nincs negatív hatása a betegség lefolyására (Abramsky, 1994).

Az SM egyik alapvető tünete a kóros fizikai fáradékonyság (fatigue). Ez már akkor is kifejezett lehet, amikor a betegnek (még) nyilvánvaló idegrendszeri kiesési tünetei nincsenek. A kóros fáradékonyságot valószínűleg az idegrendszerben folyamatosan aktív immunreakció (autoimmun gyulladás) okozza; gyógytornával, gyógyszerrel megszüntetni nem lehet. A kóros fáradékonyságot a mindennapi terhelés és fizikoterápiás kezelések tervezésekor, *a beteg munkaképességének megítélésekor* hangsúlyozottan figyelembe kell venni.

Az SM diagnózisa

Az SM-re kizárólagosan jellemző klinikai, laboratóriumi, radiológiai eltérés nincs. A diagnózis a nem, a rassz, az életkor figyelembevételével a kórtörténet és a klinikai tünetek gondos elemzésén alapszik. A fizikális vizsgálat után a *mágneses magrezonanciás vizsgálat* (MRI) az elsőként választandó eljárás, mivel igen érzékenyen mutatja ki az SM okozta agykárosodást, és a beteg számára teljesen kockázatmentes. Fontos tudni, hogy az MRI-vel kimutatható eltérések nagysága és aktivitása nincs közvetlen összefüggésben a beteg aktuális klinikai állapotával és a várható prognózissal, ezért az MRI vizsgálatok ismétlése a *beteg állapotának „kontrollálására", követésére jelenlegi tudásunk szerint indokolatlan*. Computer tomográfia (CT) még az előrehaladott, klinikailag határozott eseteknek is csak 10 %-ban mutat eltérést (szemben az MRI közel 100 %-os szenzitivitásával), ezért a CT vizsgálatnak nincs helye az SM diagnosztikájában. *(A feleslegesen végzett CT vizsgálat nemcsak felesleges kiadást jelent, hanem felesleges sugárterhelést is. Ebből a szempontból érdemes tudni, hogy egy koponya CT vizsgálat száz mell-*



2. ábra • Az MRI vizsgálat jól ábrázolja a károsodott területeket SM-ben. Ezek jellegzetesen az agy fehérállományának agykamrákhoz közeli régióiban figyelhetők meg (nyíl mutat az egyikre).

kas-átvilágítás sugárterhelését jelenti mind a beteg, mind a környezet számára.)

Az agy-gerincfolyadék (liquor cerebrospinalis) vétel az MRI megjelenése óta sokat veszített jelentőségéből. Típusos esetekben ma a nemzetközi szakmai ajánlások nem preferálják. Amennyiben mégis történik liquorvizsgálat az IgG index és az oligoclonalis gammopathia meghatározása elengedhetetlen.

Új SM-gyógyszerek

Harminc év terápiás kísérleteinek kudarcsorozata után 1993-ban közölték az első olyan vizsgálat eredményét, amely bizonyította, hogy egy beta-1b interferon-készítmény (Betaferon) a placebónál hatásosabban csökkenti az SM-ben fellépő rosszabbodások számát. Az azóta eltelt időszakban egy aminosavakból álló szert (glatiramer acetat – Copaxone) és két beta-1a interferon készítményt (Avonex, Rebif) is törzskönyveztek. Ezeket a gyógyszereket a betegek öninjekciózás formájában alkalmazzák. A szerek hatékonysága hasonló: megközelítőleg egyharmaddal csökkentik a visszaesések számát, és mérséklik a betegség következtében kialakuló agykárosodás progresszióját. Annak a betegnek érdemes elkezdeni ezeknek a kezeléseknek valamelyikét, akinek az utóbbi két évben legalább kettő vagy több rosszabbodása (subja) volt, és állapota nem rosszabb annál, hogy egy bottal legalább ötszáz métert meg tudjon tenni.

Rosszabbodás nélkül zajló esetekben nem tudunk olyan gyógyszert ajánlani, ami a tünetek progresszióját lassítaná. Ezt a betegek egy része elfogadja, míg mások mindenképpen gyógyszert akarnak szedni, „aktívan tenni" valamit a betegség előrehaladása ellen. Ilyenkor E-vitamin, növényi olajokat tartalmazó készítmények, állati zsiradékokban szegény diéta ajánlható. Sokféle tüneti kezeléssel is tudunk enyhíteni a betegek panaszain. Hatékonyan tudjuk csökkenteni a vizeletürítési panaszokat, meg tudjuk szüntetni a neuralgiás fájdalmakat, mérsékelni tudjuk a túlzott izommerevséget, kezelni tudjuk a depressziót, és számos gyógyászati segédeszköz is rendelkezésünkre áll. Túlzott vitaminfogyasztás biztosan nem használ, sőt káros is lehet. A természetgyógyászati beavatkozások igénybevételéről a betegek az elmúlt tíz évben „leszoktak", realizálva azok hosszú távon kiderült hatástalanságát.

Az új kezelési eljárásoknak köszönhetően az SM-es betegek várható kórlefolyása ma sokkal kedvezőbb, mint akár tíz évvel ezelőtt volt. A betegség az USA-ban, Angliában, a skandináv országokban, tehát a világ legfejlettebb országaiban a leggyakoribb, ennek megfelelően nagyszámú és magas színvonalú tudományos kutatás folyik újabb és a jelenlegieknél is hatékonyabb gyógyszerek kifejlesztésére.

A Guillain-Barré szindróma

A Francia Hatodik Hadsereg három orvosa, Georges Guillain, Jean Alexander Barré és André Strohl 1916-ban ismertette két tüzér kórtörténetét. Fokozódó petyhüdt izomgyengeséget, az ínreflexek kiesését, a végtagok zsibbadását, az agyfolyadékban sejtszámemelkedés nélküli fehérjeemelkedést (dissociation albumino-cytologique) észleltek. Mindkét beteg spontán meggyógyult. A betegséget leíróik után ma az egész világon Guillain-Barré szindrómának nevezik, Strohl neve, nem tudni miért, az idők folyamán feledésbe merült.

A Guillan-Barré szindróma (GBS) a környéki idegrendszer demielinizációs megbetegedése. Tünetei jellegzetesen valamilyen banális infekciót (sokszor hasmenést) követően két-három héttel kezdődnek. Általában harisnyaszerűen jelentkező lábzsibbadás lép fel először, amit lábgyengeség követ. Típusos esetben a tünetek felfelé haladnak, fokozatosan a törzset és a felső végtagokat is érintik. Ha a betegség eléri a nyaki gerincvelőből kilépő gyököket (a rekeszizmot mozgató

ideg a 4. nyaki szegmentumból ered) – légzésbénulás lép fel. Szerencsére ez csak az esetek 5-10 %-ában alakul ki, és ezek a betegek is meggyógyulnak hosszabb-rövidebb ideig tartó gépi lélegeztetés után.

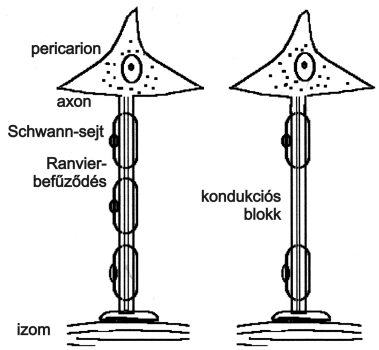
A GBS tüneteinek patológiai alapjai

Hasonlóan a sclerosis multiplexhez, a tünetek közvetlen oka ebben a betegségben is az idegrostok szigetelését, így a zavartalan ingervezetést biztosító mielin-hüvely pusztulása *(3. ábra).*

A GBS csak a környéki idegeket érinti. Ezekben az idegekben a mielin képzéséért felelős Schwann-sejtek jelentős megújuló képességgel bírnak, ami azt jelenti, hogy akár teljes demielinizáció után is képesek funkcionális szempontból teljesen helyreállítani a mielint. Ezzel magyarázható, hogy a GBS szindrómában szenvedő betegek több mint 90 %-a meggyógyul.

A GBS etiológiája és epidemiológiája

A GBS ritka kórkép, fogékonyságot meghatározó genetikai tényezőket nem ismerünk. A GBS a világ minden táján, minden rasszban hasonló számban fordul elő, incidenciája 1-2 eset/100 ezer lakos, vagyis Magyarországon évente száz-kétszáz beteggel számolhatunk. Nincs szezonalitása, gyermekkortól az öregkorig minden korcsoportban előfordul, a férfi:nő arány 1,25 : 1. A betegség pontos kóreredete ismeretlen. A legelfogadottabb hipotézis szerint a betegséget a környéki idegrendszer ellen termelődő ellenanyagok okoznák. Ezek létrejöttében a GBS-t megelőző infekció játszhat szerepet. Bizonyos kórokozók antigénjei ellen termelődő ellenanyagok keresztreakciót adnak a környéki idegrendszer antigénjeivel, ez a keresztreaktivitás a komplement rendszer aktiválódásával vezethet a demielinizáció kialakulásához.



3. ábra • Guillain-Barré szindrómában kialakuló demielinizáció sémás rajza

A GBS lefolyása

A tünetek progressziója az esetek 90 %-ban tíz–tizennégy nap alatt eléri maximumát: ha ezt követően négy héten belül a javulás megindul, jó esély van a gyógyulásra. A betegség spontán gyógyul, ám szövődmények miatt a betegek 3-5 %-át a leggondosabb ápolás mellett is elveszítjük. A halálozás a betegség korai fázisában leggyakrabban szívritmuszavar következménye, amelyben szerepet játszik a vegetatív idegek érintettsége. Légzésbénulás kialakulása esetén a lélegeztetés átlagos időtartama egy felmérés szerint ötven nap, a kórházban töltött idő átlaga száznyolc nap volt. Ezek az adatok illusztrálják, hogy a gyógyulás egyes esetekben igen hosszú folyamat.

A GBS diagnózisa

A diagnózis felállítása a kórtörténeten, klinikai tüneteken, az agy-gerincfolyadék vizsgálatán és az elektroneurográfia, elektromiográfia eredményén nyugszik. Az agyfolyadékban a sejt-fehérje disszociáció a jellemző, azaz jelentős összfehérje-emelkedés mellett nincs sejtszám-emelkedés. Elektroneurográfiával mutathatók ki a demielinizációra utaló eltérések, azaz az ingervezetés lassulása, vezetési blokkok. A betegség első heteiben az agy-gerinc folyadék és az elektroneurográfia nem mindig mutat kóros eltérést, ami nem zárja ki a betegség fennállását.

A GBS kezelése

A spontán gyógyulás időtartamát a plazmacsere (plazmaferezis), illetve az intravénás IgG kezelés megrövidíti. A két kezelési eljárás között hatékonyságban és költségeket illetően lényeges különbség nincs (The French Cooperative Group, 1997). Az intravénás IgG kezelés mellett szól, hogy bárhol egyszerűen beadható. Szteroidkezelésnek a jelenleg ismert adatok szerint nincs kedvező hatása a GBS kimenetelére (Hughes, 1991).

Krónikus inflammációs demielinizációs polineuropátia (CIDP)

A GBS-szerűen induló esetek egy részében a progresszió nyolc-tizenkét hét után sem áll meg, vagy átmeneti stagnálást, esetleg javulást követően újabb rosszabbodás lép fel. A CIDP gyakorisága ismeretlen, a becslések prevalenciáját 0,1-1 beteg/100 ezer lakosra teszik. Lényeges különbség a GBS-sel szemben, hogy kezelés nélkül ez a kórforma nem gyógyul meg. Kezelésében általánosan elfogadott a másnaponta adott 60-100 mg prednizolon vagy metilprednizolon. A javulás sokszor csak több hónapos kezelés után jelentkezik. Tartós javulás után a dózis fokozatosan csökkenthető, és megtalálható az a minimális dózis, amellyel a beteg egyensúlyban tartható. Néhány esetben gyógyszermentes periódusokat is be lehet iktatni. Szteroid hatástalansága esetén intravénás IgG, plazmaferezis, immunaktivitást csökkentő gyógyszerek alkalmazása lehet eredményes.

Myasthenia gravis

„32 éves budapesti autóbuszvezető azzal a panasszal kereste fel háziorvosát, hogy a végállomásról elindulva kb. tíz perc elteltével bal szemhéja fokozatosan leereszkedik, kb. fél óra múlva szeme teljesen lecsukódik. Visszaérkezve a végállomásra a fordulók közti időben szemét pihenteti, a szemhéj-csüngés elmúlik, vezetés közben újra visszatér."

„40 éves tanárnő az első órát még zavartalanul megtartja, a második óra végére kettőslátása lép fel, harmadik-negyedik óráját már több alkalommal nem tudta megtartani, mert beszéde elkentté, érthetetlenné vált. Evés közben rágóizmai elfáradnak, néha félrenyeli a falatot. Pihenés után panaszai mindig javulnak."

Az MG tüneteinek immunpatológiai alapja

A betegség tünetei azért alakulnak ki, mert az idegrendszeri impulzusok nem tevődnek át az izomzatra. Ennek az az oka, hogy a betegek szervezetében (valószínűleg a csecsemőmirigy kóros aktivitása következtében) olyan kóros fehérjék (autoantitestek) termelődnek, melyek blokkolják az izomsejtek felszínén elhelyezkedő acetilkolin receptorokat. Az autoimmun eredetet azzal bizonyították, hogy betegekből izolált ellenanyagokkal és T-limfocitákkal ki tudták váltani a betegséget állatokban.

Az MG epidemiológiája

A betegség gyakorisága a világon mindenütt 5-10/100 ezer körüli. Dániában egy közelmúltban végzett epidemiológiai tanulmány a prevalenciát a nők körében 9,6/100 ezernek, férfiak körében 5,7/100 ezernek találta, évente egymillió lakosra 4,4 új esetet találtak. Magyarországon hasonló előfordulási gyakoriságokkal számolhatunk. A betegség negyvenöt év alatt nőkben, hatvan év felett férfiakban gyakoribb. Az MG kora gyermekkortól öregkorig bármikor kezdődhet, saját gyakorlatunkban találkoztunk nyolcéves beteggel is, a legidősebb betegünk pedig kilencvenéves volt, amikor a betegség első tünetei megjelentek nála.

Az MG klinikai tünetei, lefolyása

A myasthenia gravisre a harántcsíkolt izomzat fájdalom nélkül kialakuló kóros fáradékonysága a jellemző. A betegség kezdetén hosz-

szabb spontán tüneti remissziók is kialakulhatnak, sokszor a beteg panaszait hosszú ideig funkcionális eredetűnek (neurotikusnak, szomatizátiós zavarnak) minősítik. MG gyanúja esetén a pácienst negatív diagnosztikus tesztek ellenére is gondosan (és néha hosszú ideig) meg kell figyelni, mire a diagnózis felállíthatóvá válik.

Az MG nagyon változatos formákban és lefolyásban jelenik meg. A betegség első tünete lehet szemhéj-csüngés, kettős látás, rágásgyengeség, nyelészavar, végtaggyengeség. A tünetek közül bármelyik megjelenhet önállóan, de bármilyen kombinációban is előfordulhatnak. Jellegzetes a kóros fáradékonyság, azaz az érintett izomcsoport ismételt igénybevételekor a tünetek súlyosbodnak: például pislogás után a szeméjcsüngés fokozódik, beszéd során a hang elhalkul. Rövid pihenés után az izomteljesítmény általában átmenetileg javul, majd ismételt terhelésre újra romlik.

Az izmok gyengesége kezelés nélkül fokozódik, a légzőizomzat gyengesége légzésbénuláshoz, myastheniás krízishez vezethet. A krízisek száma az immunszupresszív kezelések elterjedése óta lényegesen lecsökkent. A myastheniás krízisek halálozása néhány évtizede még 30 % körüli volt, a mai korszerű intenzív ellátás mellett ez az arány néhány %.

Az MG diagnózisa

A diagnózis felállításában alapvető szerepet játszik az edrophonium (Tensilon) teszt. Az acetilkolineszteráz-bénító endrophonium intravénás beadását követően a beteg tünetei azonnal megszűnnek vagy jelentősen javulnak, majd a hatás öt-húsz perc múlva elmúlik, és a tünetek visszatérnek. A szérumban az acetilkolin-receptorok ellen termelődött ellenanyag kimutatása igazolja a panaszok myastheniás eredetét, hiánya azonban azt nem zárja ki. Az ellenanyag-titer és a myasthenia súlyossága között nincs szoros összefüggés: magas ellenanyag-szinttel lehet a beteg tünetmentes, és alacsony ellenanyag-szinttel kerülhet myastheniás krízisbe. Elektromiográfiával lehet igazolni az ideg-izom átkapcsolódás zavarát. MG klinikai gyanúja esetén mindig el kell végezni a mellkas CT vizsgálatát a csecsemőmirigy esetleges kóros eltéréseinek kimutatása érdekében. A CT alapján tud a mediastinum radiológiai vizsgálatában jártas radiológus szakember arról dönteni, hogy szükséges-e a CT-t MRI-vel kiegészíteni.

Az MG kezelése

Csecsemőmirigy (thymus)-daganat estében mindig meg kell operálni a beteget, fiatalkori formákban a vissza nem fejlődött csecsemőmirigy eltávolítása is indokolt. A betegség korai fázisában végzett thymus-eltávolítás az esetek 25 %-ában remisszióhoz vezet, a betegek 50 %-a javul, a thymectomiának nincs kimutatható hatása az esetek 25 %-ban (Newsom-Davis, 1998).

Enyhe, generalizált MG kezelésében sok esetben a kolineszteráz-bénító gyógyszerek (Mestinon, Mytelase) adása elegendő. Ha a beteg ezekkel a gyógyszerekkel nem tartható tünetmentes állapotban, kombinált immunmoduláló kezelés beállítása indokolt. Naponta adott 2,5 mg azatioprin (Imuran) és másnaponta adott 1-1,5 mg/tkg metylprednisolon alkalmazásával a súlyos betegek is tünetmentessé tehetők, és a myastheniás krízisek megelőzhetők. Tekintettel arra, hogy magas dózissal indított szteroidkezelés akár myastheniás krízisbe torkolló rosszabbodást provokálhat, a szteroid beállítása alacsony dózissal kezdve, óvatosan történik. Azok számára, akik az azathioprint nem tolerálják, alternatívaként methotrexat (például heti 10 mg), vagy cyclosporin kezelés jön szóba. Idős betegeknél a szteroidkezelés fokozott kockázatát jelentő hypertoniát, obesitást, diabetest mindig gondosan mérlegeljük, azonban amennyiben a beteg más módon nem tartható egyensúlyban, a relatív kontraidikációk ellenére is felajánljuk a be-

tegeknek a kezelést, tudniilik ennek kockázata még mindig kisebb lehet, mint a krízis során szükséges gépi lélegeztetés, az intenzív kezelés lehetséges szövődményei. Fiatal nőbetegek tartós szteroidkezelése esetében a csontritkulás megelőzésére kiemelten figyelünk.

Myastheniás krízisben, vagy annak veszélye esetén plazmaferezis alkalmazása indokolt.

Az intravénás IgG kezelés hatékonysága hasonló a plazmaferezis effektivitásához.

Számos gyógyszer kontraindikált az MG-ben, műtéti beavatkozások, egyszerű infekciók (például légúti hurut) kapcsán myastheniás krízis alakulhat ki. Fontos tehát, hogy a beteg bármikor olyan intézményhez fordulhasson, ahol a MG ellátásának teljes spektruma (diagnosztika, intenzív ellátás, plazmaferezis, gondozás) rendelkezésre áll. A betegség ritkasága (hazánkban nyolcszáz–ezer főre tehető a betegek száma) és igen változatos individuális lefolyása indokolja, hogy a betegek kezelését MG kezelésében nagy gyakorlattal rendelkező neurológus irányítsa. A betegségről az Akadémiai Kiadó gondozásában 1990-ben kitűnő és igen részletes monográfia jelent meg Szobor Albert tollából, akinek munkatársaival együtt elévülhetetlen érdemei vannak abban, hogy Magyarországon európai színvonalon történhet az MG-ben szenvedő betegek ellátása.

*Paraneoplá*ziás idegrendszeri szindrómák

„48 éves nőnek enyhe kézremegése, járási bizonytalansága alakult ki, bal mellében csomót vett észre. Szövettani vizsgálat mellrákot igazolt, amit 1981-ben eltávolítottak. A műtét után is tovább fokozódott járási bizonytalansága, kézremegése. Ismételt részletes ideggyógyászati kivizsgálás eredményeként enyhe kisagyi sorvadást, vérében anti-Hu ellenanyagot találtak. Szteroidkezelés, plazmaferezis alkalmazása ellenére idegrendszeri tünetei lassan, fokozatosan rosszabbodnak, ami miatt – a jelenleg is daganatmentes beteg – tolókocsiba kényszerült."

A paranaeopláziás neurológiai szövődmények rosszindulatú daganatok (leggyakrabban tüdőrák, mellrák) direkt idegszövetre terjedése ***nélkül***, távoli tumorhatásként alakulnak ki. A tumorellenes immunválasz során keletkeznek olyan autoantitestek, melyek keresztreakciót adnak bizonyos idegrendszeri fehérjékkel. Paraneoplá*ziás idegrendszeri szindrómában szenvedő betegekből számos idegrendszer-elleni ellenanyagot igazoltak. *Az egyik az „anti-Hu" antitest, amely az idegsejtek egyik nukleáris RNS-kötõ fehérjéje. Kisagyi Purkinje-sejt ellenes ellenanyag az „anti-Yo" antitest, másik anti-nukleáris antitest az „anti-RI" antitest*. A paraneoplá*ziás szindrómák diagnosztizálása azért fontos, mert felismerésükkel esélyünk van, hogy a rosszindulatú folyamatot olyan stádiumban fedezzük fel, amikor az még gyógyítható. Vannak adatok, amelyek arra utalnak, hogy az antineurális autoantitesteket hordozó karcinómás betegek túlélése kedvezőbb, azonban egyes esetekben a paraneoplá*ziás eredetű idegrendszeri tünetek a daganat teljes eltávolítása után is rosszabbodnak, melyek (mint a bevezető esetismertetésben olvasható) a beteget mozgáskorlátozottá tehetik.

Összefoglalás

A szerző a közleményben a leggyakoribb neuroimmunológiai betegségek klinikumát, diagnosztikáját és terápiás lehetőségeit ismerteti. Meggyógyítani még ma sem tudjuk ezeket a betegségeket, azonban a betegek döntő többsége számára rendelkezünk hatékony terápiás eljárással. Sclerosis multiplexben csökkenteni tudjuk a rosszabbodások számát, Guillain-Barré szindrómában meg tudjuk rövidíteni a gyógyulás idejét, myasthenia gravisban meg tudjuk előzni a kríziseket, és a betegek döntő többségét tünetmentes állapotban tudjuk tartani.

Köszönetnyilvánítás

Szerző ezúton fejezi ki köszönetét a kézirattal kapcsolatos segítő megjegyzésekért dr. Bihari Varga Magdolnának, dr. Csanda Endrének és dr. Gerő Gábornak.

Kulcsszavak: *sclerosis multiplex, Guillain-Barré szindróma, CIDP, myasthenia gravis, paraneoplaziás idegrendszeri szindrómák, interferon, glatiramer acetat, plazmaferezis, intravénás IgG kezelés*

IRODALOM

Abramsky, Oded (1994): Pregnancy and Multiple Sclerosis. Annals of Neurology. 36, S38-S41

Bencsik Krisztina – Rajda C. – Klivényi P., et. al. (1998): The Prevalence of Multiple Sclerosis in the Hungarian City of Szeged. Acta Neurologica Scandinavica. 97, 315-319.

Hughes Richard A. C. (1991): Ineffectiveness of High Dose Intravenous Methylprednisolone in Guillain-Barre Syndrome. The Lancet. 338, 1142.

Komoly Sámuel – Hudson, L. D. – Webster, H. de F. – Bondy, C. A. (1992): Insulin-like Growth Factor Gene Expression Is Induced in Astrocytes during Demyelination. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 89,1894-1897.

Lovas Gábor – Szilágyi N. – Majtényi K. – Palkovits M. – Komoly S. (2000). Axonal Changes in Chronic Demyelinated Cervical Spinal Cord Plaques. Brain. 123, 308-317.

Newsom-Davis John (1997) Myasthenia Gravis and Related Syndromes in Disorders of the Voluntary Muscle. in: Walton, John – Karpati, George – Hilton-Jones, David (eds.): *Disorders of Voluntary Muscle*. Churchill Livingstone, Edinburgh. 761-780.

Szobor Albert (1990): *Myasthenia gravis*. Akadémiai, Budapest.

The French Cooperative Group on Plasma Exchange in Guillain-Barre Syndrome: Appropiate Number of Plasma Exchanges in Guillain-Barre Syndrome. (1997) Annals of Neurology. 41, 298.

Tudós fórum

TUDOMÁNY – MINDENKINEK

November a tudomány hónapja lesz Magyarországon. Az előkészületekről az Akadémia elnöke, Vizi E. Szilveszter beszél a Magyar Tudománynak.

November harmadikán, a Tudomány Napján, idén is megkezdõdik Magyarországon a tudományt népszerûsítõ rendezvénysorozat.

Igen. Hagyomány már, hogy ilyenkor a magyar és a nemzetközi tudomány legfrissebb eredményeit próbáljuk meg központba állítani. Azon igyekszünk, hogy kiváló előadók egyszerű nyelven tegyék mindenki számára hozzáférhetővé a tudomány eredményeit. Megszervezzük, hogy a különböző iskolák tanulói meglátogathassák a kutatóintézeteket. Minden igyekezetünk arra irányul, hogy megmutassuk a közvéleménynek, milyen fontos szerepet játszik a tudomány a 21. században. Be kell bizonyítanunk az adófizetőknek, hogy adóforintjaik jó helyre kerülnek, amikor a tudományt támogatja a kormányzat. Meg kell mutatnunk, hogy milyen fontos szerepe van és lesz a tudománynak Magyarországon és az Európai Unióban egyaránt.

Szokás, hogy ilyenkor megemlékezzünk valamely nagy elődünkről. Most, születésének századik évfordulóján, Neumann János lesz ez a tudós. Ugyanakkor a rá való megemlékezés alkalmat ad nekünk arra is, hogy megmutassuk: az információs forradalom napjait, éveit éljük. Azt ma már nem kell bizonygatni, hogy Neumann mekkora szerepet játszott a számítógép születésénél, hogy ő és társai, a magyar származású tudósok milyen sokkal járultak hozzá a világ tudományosságához. Eredményeik ma, az információs robbanás korában még fontosabbak.

Szent-Györgyi Albert mondta: az emberi elme nem az adatok tárolására való, hanem arra, hogy abban új gondolatok szülessenek. Ma itt van nekünk a computer, amely száraz adatok millióit, milliárdjait tárolja, s ezzel kiegészíti agyunk sajátos, csak az emberre jellemző kombinatorikus képességét. Ezért gyorsult fel a világ fejlődése. Mert agyunk mellett ott van a számítógép, ez a munkánkat segítő, adatokat tároló, mesterséges agy.

Mekkora szerepet vállalt az Akadémia a Tudomány Napja szervezésébõl?

Mi szervezzük, bár valamennyi minisztérium részt vesz benne. A tárcák már elküldték képviselőiket a szervezőbizottságba. Mint ahogy az elmúlt években, idén is a professzionális lebonyolítás a cél. Külön kötetben adjuk ki a programot, munkánkhoz felhasználjuk a tömegkommunikáció eszközeit is.

A rendezvény programja évről évre bővül. Bár a Tudomány Napjáról beszélünk, igazából ez már egy egész hónap. A középiskolák, főiskolák, egyetemek megszervezik külön programjaikat, a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat programok sorát rendezi. Az a célunk, hogy a tudományt abba a pozícióba emeljük, amelybe való. Ezért mennek

híres tudósok előadásokat tartani az iskolákba, ezért lehetünk majd szem- és fültanúi nagyszabású tudományos rendezvényeknek.

Meggyőződésem, hogy ez nagyon fontos esemény. A 21. század tudósának vannak jogai – ilyen például a tudás megszerzése; de van kötelessége is, hogy a megszerzett tudást másokkal is megismertesse.

A Tudomány Hete már hagyomány, de az a nemzetközi fórum, amelyet ekkor tartanak, példa nélkül áll.

A Tudomány Hetének fontosságát is emeli, hogy november 8. és 10. között itt, Budapesten rendezzük meg a World Science Forumot, vagyis a Tudomány Világtalálkozóját. Ilyen még sosem volt. A rendezvény egyik fővédnöke Mádl Ferenc, köztársaságunk elnöke, a másik Romano Prodi, az Európai Bizottság elnöke lesz, aki nagy örömmel fogadta el a felkérést. Ide várjuk az UNESCO főigazgatóját, s november 10-én itt, Budapesten ünnepeljük meg a Tudomány Világnapját. Ez az ülés a Parlamentben lesz, ahol a magyar kormány tagjain kívül jelen lesznek a nemzetközi élet kiemelkedő személyiségei is. Itt lesz Lámfalussy Sándor professzor, az euro atyja; John Marburger, George W. Bush elnök tudományos főtanácsadója, a kínai Akadémia elnöke. Írók, költők, közéleti személyiségek jönnek, köztük Viktória hercegnő, a svéd trónörökös.. Ezen a napon arról beszélnek majd vendégeink, hogy mi mindent kap a világ a tudománytól, hogy hogyan változtatja meg az életünket, hogy milyen demográfiai és környezeti problémákat hozott a gazdaság gyors fejlődése, hogy milyen lesz a tudomány a 21. században. A rendezvény fő gondolata: Knowledge and Society – tudás és társadalom.

Nyilván nem véletlen, hogy erre a rendezvényre néhány hónappal uniós csatlakozásunk elõtt kerül sor.

Persze. Már az előző kormány is elfogadta ezt a javaslatunkat, s a mostani kormány is támogatta azt. Az Európai Unió tudásalapú társadalmat épít, Magyarország jövője a tudomány nélkül elképzelhetetlen. Ilyen rendezvényre, mint a World Science Forum, még nem került sor a világon. Davos világhírű lett, mert ott rendezik meg évente a gazdasági csúcsot. Miért ne volna lehetséges, hogy Budapest legyen az otthona az évente megrendezésre kerülő, tudománnyal foglalkozó világfórumnak? Mint ebből is kitűnik, hosszú távú gondolkodás jellemezte a Magyar Tudományos Akadémiát, amikor elhatároztuk, hogy megrendezzük ezt a Fórumot.

WORLD SCIENCE FORUM

Magyarország hozzáadott értéke a világ és az európai uniós közösség számára a magyarok tudásbázisa, a magyar tudomány eredményei és kiválóságai. Ennek a gondolatnak a jegyében kapott széleskörű kormányzati és társadalmi támogatást az elmúlt három évben a kezdeményezés, hogy éppen Budapest adjon otthont annak a konferenciának, amely a tudás szerepét tárgyalja a társadalom, a gazdaság, a közösségek életében. Az időszak magyar kormányai összesen 145 MFt támogatásban részesítették a konferencia szervezését, de jelentős felajánlások érkeztek a magyar gazdaság meghatározó tényezőitől is.

A tanácskozáson augusztusi állapot szerint 51 ország 104 tudósa, gazdasági és közéleti kiválósága vesz részt, valamint delegációt küld az EU, az UNESCO és az ICSU.

A World Science Forum főelőadói a következő neves tudósok lesznek: Alexander Lámfalussy, a European Monetary Institute elnöke; John Marburger III., az USA-beli Office of Science and Technology Policy igazgatója; Goverdhan Mehta, az Indiai Tudományos Akadémia volt elnöke; William A. Wulf, az USA-beli Műszaki Tudományos Akadémia elnöke, valamint Lu Yongxiang, a Kínai Tudományos Akadémia elnöke.

A Fórum szervezésében a legtekintélyesebb magyar tudósok vesznek részt. A Fórum elnöke Vizi E. Szilveszter, az MTA elnöke; a szervezőbizottság elnöke Kroó Norbert, az MTA főtitkára; ügyvezető igazgatója Gulyás Balázs, az MTA külső tagja. A szervezőbizottság munkáját nemzetközi tanácsadó testület segíti, melynek elnöke Hámori József, az MTA alelnöke, az 1999. évi Tudomány Világkonferenciájának elnöke.

A konferencia három napon át, hat szekcióban folytatja munkáját:

- Tudásalapú társadalom;
- Tudásalapú gazdaság;
- Tudás és tudomány;
- Tudás és életminőség;
- Tudás, környezet, fejlődés;
- Információalapú társadalom és tudás.

A plenáris üléseken részt vesz Mádl Ferenc államfő, Medgyesy Péter miniszterelnök, vendégként több ország kutatási-tudományos minisztere. Átadják az UNESCO 7 nemzetközi tudományos díját, és a Fiatal Tudósok Fórumának képviselői is referátumot tartanak.

A fórum megszervezésével az MTA a legértékesebb akadémiai hagyományt, a párbeszédet, az álláspontok közötti közvetítést folytatja. Ennek megvalósulása a virtuális előkonferencia is, amely a www.sciforum.hu webhelyen indult el.

MAGYAR MOLEKULÁRIS ÉS PREDIKTÍV EPIDEMIOLÓGIAI TÁRSASÁG

A Társaság 2002. december 12-én alakult meg Pécsett. Tekintettel arra, hogy a XXI. századi orvostudomány erősen támaszkodik a megelőzésre, a környezetvédelemre és a molekuláris biológiára, annak frekventált alkalmazására, továbbá a krónikus nem fertőző népbetegségek és az újonnan felmerülő fertőző betegségek jelentőségének fokozódásával a hatékony primer és szekunder prevenció molekuláris irányba mozdulhat el. Ezért elhatároztuk egy olyan társaság létrehozását, amelynek célja ezen betegségek populációs szintű felmérése, elemzése, molekuláris biológiai módszerek, markerek, biomarkerek alkalmazása a hatékony megelőzés módszerének alkalmazásával.

A Társaság I. Nemzeti Kongresszusát
(nemzetközi részvétellel)
2003. november 27-28-29-én tartja Pécsett.

Főtéma: A daganatok molekuláris és prediktív epidemiológiája.
A kongresszus jelentkezési és előadás-bejelentési határideje: 2003. szeptember 30.
Információ: Pécsi Tudományegyetem Általános Orvosi Kar Közegészségtani Intézet, 7643 Pécs, Szigeti út 12.; tel.: (72) 536394

A társaság tisztelettel hív és vár a soraiba és a kongresszusra mindenkit, aki a céljai irányában elkötelezett, és érdeklődik a téma iránt.

Ember István
egyetemi tanár, a Társaság elnöke

KÖSZÖNTÕ

Szinte hihetetlen, hogy e szám vendégszerkesztője, Gyulai József, az MTA rendes tagja, aki telve energiával, kezdeményezőkészséggel, ma is számtalan felelősségteljes megbízást visel a vállán, immár a 70. születésnapját ünnepli 2003. augusztus 21-én!

Hosszú út vezetett szülővárosából, Hódmezővásárhelyről, melynek ez évtől díszpolgára, a szegedi egyetemi és fizikusi kutató évek után a KFKI-ba, Csillebércre, ahol szakmai pályája kiteljesedett. Korán eljegyezte magát a félvezető szerkezetek kutatásával, ezen a területen szerzett kandidátusi fokozatot, majd – ahogy ő szokta mondani – „szerencsés véletlenek sorozata" után pályafutása az ionsugaras technikákkal, elsősorban az ionimplantációval fonódott egybe. Ehhez azonban az USA akkoriban ezen a területen vezető laboratóriumaiban folytatott többéves kutatáson, számos külföldi vendégprofesszori meghíváson keresztül vezetett az út. Mivel az ionimplantáció a mikroelektronikai integráció, a méretcsökkentett eszközök fejlesztésének máig egyik kulcstechnológiája, munkássága végig az ipari fejlődés fókuszában zajlott. Alkotó részese lehetett több olyan felfedezésnek, mint például a szilárd fázisú epitaxiás kristály-visszanövesztés módszere, melyek a mai napig alapvetően meghatározzák az ion-implantációs technika alkalmasságát a félvezető szerkezetek kontrollált adalékolására. Akkori vezetői támogatása révén az ionsugaras kutatás hazai feltételei is kialakulhattak a KFKI-ban, ezen a bázison nevéhez kötődik a hazai ionimplantációs iskola létrehozása, és az ionsugaras analitika bevezetése a félvezető technológiai kutatás-fejlesztésbe. A hazai mikroelektronikai fejlesztési programban vállalt megbízatást követően figyelme szinte kizárólag a kutatás és az egyetemi oktatás felé fordult. A fizikai tudomány doktora, 1985-től a BME Kísérleti Fizika tanszékének professzora, majd tanszékvezetője. 1992-ben az egyik KFKI utódintézet, a KFKI Anyagtudományi Kutató Intézet névadó igazgatója lett, majd 1998 óta az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet igazgatója. Számos nemzetközi konferencia szervezésével, Magyarországra hozatalával, nemzetközi szervezetekben viselt tisztségeivel (EMRS VB tagság, a Böhmische Physical Society kancellárság, IUPAP alelnökség) öregbítette a magyar tudomány hírnevét.

Munkásságát itthon is elismerés övezi. 1993-ban Széchenyi-díjban részesült, az MTA 1990-ben levelező, majd 1995-ben rendes tagjává választotta. Jelenleg a Műszaki Tudományok Osztályának elnökhelyettese, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat idén leköszönt elnöke. Az interdiszciplináris kutatás, az anyagtudomány egységes szemléletű művelésének elkötelezett híveként természetes, hogy a nanotudomány- és technológia kezdeti lépéseinek egyengetésében is kulcsszerepet vállal, nem csak mint kutató, de az európai nanotechnológiai tudományos pályázati rendszer hazai képviselőjeként is.

E különszám szerzői ezzel a kötettel köszöntik az ünnepeltet a szélesebben vett anyagtudományi területen dolgozó kollégáik nevében is, és jó egészséget kívánnak további aktív tudományos, tudományszervezői és oktatói munkásságához!

Kitekintés

A HIDROGÉN-ENERGETIKA SEM LESZ KÖRNYEZETBARÁT?

Az energetika jövőjét tárgyaló tanulmányok a nagy ígéretek között tárgyalják a környezetbarát hidrogén üzemanyagcellákat, a hidrogén üzemanyagra alapozott energetikát. A hidrogén előállítása egyszerű, vízbontással nyerik, villamos energia befektetésével. Csővezetékeken jól szállítható. Felhasználásakor, elégetésekor csak víz keletkezik, így a szén-, olaj- vagy gáztüzeléssel szemben nem szennyezi a levegőt korom, nem keletkeznek nitrogén-oxidok, sem más szennyező anyagok. A jövőbeni hidrogén-energetika műszaki részleteit és elterjedését ma még csak becsülni lehet.

A mai gázszállítási technológiák ismeretében joggal feltételezhető, hogy a hidrogén-termelés, -tárolás és -szállítás során óhatatlanul veszteségek keletkeznek, és ez a hidrogén az atmoszférába kerül. Becslések szerint a veszteség 10-20 % közé eshet. Ha feltételezzük, hogy az olaj és földgáz elégetésére alapozott mai technológiákat hidrogén üzemanyagcellák váltják fel, akkor 4-8-szor annyi hidrogén kerül emberi tevékenység következtében a légkörbe, mint jelenleg. A légköri hidrogénháztartásban az emberi tevékenység hatása válik uralkodóvá. A sztratoszféra nedvesebbé válik, emiatt alsó rétegei lehűlnek. A sarkvidékeken több felhő lesz a sztratoszférában, emiatt az ózonlyuk mélyebb és nagyobb, nehezebben változó lesz. Az északi sarkvidéken nagyobb lesz a változás, mivel a déli ózonlyuk már „telítődött". A klórozott szénhidrogének légkörbe bocsátásának tilalma miatt az ózonréteg lassan regenerálódna, ezt a folyamatot az erősödő hidrogénkibocsátás jelentősen le fogja lassítani. Az ózonlyukak jövője nagyban múlik azon, hogy mikor terjed el a hidrogén-energetika. Ha csak ötven év múlva, akkor addigra a klórozott szénhidrogének szintje már erősen lecsökken, a többlethidrogén megjelenése nem ront tovább a helyzeten.

Több lényeges tényezőről egyelőre kevés ismerettel rendelkezünk. Ilyen például a talaj hidrogénfelvevő képessége. Nem ismeretes kellőképpen sem ennek a mechanizmusa, sem az időbeli és térbeli változások okai. Elképzelhető, hogy a talaj képes lesz elnyelni az összes felszabaduló hidrogént, tehát nem jelentkeznek légköri hatások. A szerzők további, általuk nem elemzett kérdések vizsgálatát is javasolják. Ilyen a világító felhők lehetséges elszaporodása, ezek megváltoztathatják a Föld albedóját (fényvisszaverő képességét), ez pedig a légköri kémiai folyamatok megváltozásához vezethet. Feltáratlan terület a talajba került többlethidrogén hatása a hidrogént felhasználó mikrobaközösségek életére.

Tromp Tracey K. et al.: Potential Environmental Impact of a Hydrogen Ecomomy on the Stratosphere. Science. **300.** 13 June 2003. 1740-1742

J. L.

SZÁMÍTÓGÉPPEL TERVEZETT SZUPERÖTVÖZETEK

Új és újabb fémötvözetek előállítása a bronzkortól a közelmúltig lényegében változatlanul, próbálkozásokkal történt. A szilárdtestfizika, az anyagtudomány ma már lehetővé teszi kívánt tulajdonságú ötvözetek nagy-

teljesítményű számítógépekkel való tervezését. Az első egyszerű modellek az 1970-es években születtek meg. Kémiai elemek szokatlan, korábban nem próbált, öt vagy több összetevőből álló egyvelegeivel kísérleteztek. Így születtek például új, nagyszilárdságú, szuperkorrózió tulajdonságokkal rendelkező fémüvegek (alumínium-vas-gadolínium, cirkon-titán-nikkel-réz-berillium). A Toyota központi kutató-fejlesztő laboratóriumában ultraerős, szuperrugalmas és szuperképlékeny ötvözeteket fedeztek fel. Az ötvözetek széles hőmérséklettartományban mutatnak szupertulajdonságokat, beleértve a szobahőmérsékletet is. A számítógépes szimulációk során kiderült, hogy három, számszerűen megfogalmazható feltétel (elektron/atom arány, kötési erősség, elektronegativitás) együttes teljesülése esetén állnak elő a szupertulajdonságok. Az új ötvözetek alapanyaga titán, ehhez tantált, nióbiumot, cirkont, vanádiumot és oxigént adnak, az eredmény egy egyszerű tércentrált köbös kristályszerkezet. Az ötvözetet még hidegmegmunkálásnak is alá kell vetni, csak azután jelentkeznek a szupertulajdonságok. A három „mágikus szám" és a hidegmegmunkálás szerepének részletei még tisztázásra várnak.

Shiflet, Gary: The More Elements, the Merrier. Science. **300.** 18 April 2003. 443-444.
Saito, T. et al.: Multifunctional Alloys Obtained via a Dislocation-Free Plastic Deformation Mechanism. Science. **300.** 18 April 2003. 464-467

J. L.

TIZENHÁROMMILLIÁRD ÉVES BOLYGÓ

Az eddig ismert legősibb és a Földtől legtávolabbra eső bolygót a Hubble-űrteleszkóp felvételei alapján azonosították. Az exobolygó a Földtől 5600 fényévnyire levő ősi gömbhalmaz magjában kering egy kiégett csillagkettős körül. Keringési ideje kb. száz év, a gázóriás tömege a Jupiterének két és félszerese. Kora tizenhárommilliárd év, tehát jóval öregebb a mindössze 4,5 milliárd éves saját Naprendszerünknél. Nagyon korán, mintegy egymilliárd évvel az ősrobbanás után keletkezhetett. Az ősi bolygó létéből arra lehet következtetni, hogy a bolygóképződés a korábban gondoltnál jóval korábban megkezdődött, tehát nagyon sok bolygó lehet az univerzumban. A korai szakaszban még kevés nehéz elem volt az univerzumban, ezért nem tartották valószínűnek, hogy már akkor is képződhettek bolygók. A bolygó váratlan helyen bukkant fel, ugyanis a fehér törpe és a gyorsan, másodpercenként százszor körbeforgó neutroncsillag páros közelében egy törékeny bolygórendszer széthullása lenne inkább várható. A kettős csillag melletti harmadik objektumot már több mint egy évtizede ismerik a csillagászok, azóta vitatták mibenlétét. Most a Hubble felvételei alapján eldőlt a vita.

http://science.nasa.gov/headlines/y2003/10jul_psrplanet.htm
http://hubblesite.org/news/2003/19

J. L.

ÁLLAMI KUTATÓINTÉZETEK AZ EURÓPAI UNIÓBAN

Július végén tette közzé az EU állami kutatóintézményeiről készített felmérést az Európai Bizottság. 769 állami kutatóközpont adatai alapján nyilvánvaló, hogy az általánosan elterjedt nézetekkel szemben ezek az intézmények egyáltalán nem hanyatlanak. Bebizonyosodott, hogy ez a szektor sokkal nagyobb és sokkal dinamikusabb, mint többnyire gondolják. Egyre erősebbek az iparral kiépített kapcsolatai, az utóbbi években a hangsúly az alapkutatásokról az iparral együttműködésben folyó alkalmazott kuta-

tásokra tevődött át. Az állami kutatóintézetek kulcsszerepet játszanak a Lisszabonban megfogalmazott cél valóra váltásában: az EU legyen a világ legversenyképesebb tudásalapú gazdasága.

Az egyetemi kutatások és az ipari kutatások története, szerepe jóval ismertebb, mint az állami intézeteké. A legrégebbi állami laboratóriumot 1670-ben alapították, de az állami intézetek csaknem felét az elmúlt húsz évben, az információtechnológia és a biotechnológia fellendülésének idején hozták létre. Ma több mint tízezer kutatót foglalkoztatnak, éves költségvetésük meghaladja a 25 milliárd eurót. Az EU-ban nagyobb az állami szektor aránya a K+F ráfordításokból, mint az USA-ban vagy Japánban (EU 13,6 %, USA: 7,5 %, Japán: 9,9 %). A közvetlen költségvetési finanszírozás aránya az USA-ban 0,6 %-kal, Japánban 4,5 %-kal nőtt, ezzel szemben az EU-ban 1,2 %-kal csökkent az elmúlt évtizedben.

Az intézmények jelentős részének jól meghatározott feladata van, elsősorban a kis és közepes vállalkozásokat segítik a hagyományos szektorokban. Kritikus szerepük van az Európai Kutatási Térség kialakításában. Az intézetek 92 %-a végez alkalmazott kutatást, alapkutatást csak 50 %-uk. Tevékenységük elsősorban a műszaki tudományokra koncentrálódik, ezt követik a természettudományok, majd az agrártudományok, társadalomtudományok, az orvostudományok és a bölcsészettudományok.

A jelentés az adatok értékelése alapján következtetéseket, teendőket is megfogalmaz. Javítani kell az állami intézmények innovációtámogató képességét. Meg kell őrizni szellemi tőkéjüket, legyenek stratégiai kutatóbázisok, amelyek ellenállnak a csak konzultációs szolgáltatásokat igénylő piaci nyomásnak. A kutatóintézmények által nyújtott szolgáltatások jelentős részét ésszerűsíteni lehetne. Egyes területeken a szakértelmet és az eszközöket az egységes európai piacnak kellene fenntartania, ezzel csökkennének a működési költségek. A közszolgáltatások és a jogi keretek harmonizációja pozitív hatással lenne az integrációra.

A felmérés mind a 769 intézményre kiterjedt, 49-ről részletes elemzés készült. A programot a Manchesteri Egyetem munkatársai vezették francia, svéd, spanyol és holland közreműködőkkel.

http://www.cordis.lu/indicators/publications.htm

J. L.

A LEGKISEBB PÖRGETTYŰ

A világ legkisebb forgó alkatrészét, egy parányi elektromechanikus rotort állítottak elő amerikai kutatók a híres Kalifornia Egyetemen, Berkeley-ben – írja a *Nature* július 24-i száma.. A pici „pörgettyű" aranylapátja – melynek szélessége kétezerszer kisebb egy hajszál vastagságánál – egy dupla falú szén nanocsövön forog, és ez utóbbit arany elektródok kapcsolják össze egy szilícium-mikrochippel. Működtetése egyszerű, az elektródokra kapcsolt váltakozó feszültség hatására egészen nagy sebességgel is képes pörögni, ezért több területen is – például gyors optikai kapcsolóként vagy speciális kémiai érzékelőként – használható lesz. A fejlesztést vezető Alex Zettl professzor szerint azonban a legérdekesebb alkalmazások azok lesznek, amelyekre ma még senki nem gondol, ahogy az első lézerek, vagy integrált áramkörök megszületésekor sem látta senki ezek rendkívül sikeres és sokoldalú jövőjét.

Egy mindenesetre biztos: az eddig készített hasonló szerkezetek lényegesen nagyobbak voltak.

FENNIMORE, Adam et al. Rotational Actuators Based on Carbon Nanotubes. Nature. **424,** 24 July 2003. 408-410.

G. J.

A ZÖLD TEA MÉG JOBB

A zöld tea rákellenes hatásának új kísérleti bizonyítékával rukkoltak elő az amerikai Rochester Egyetem kutatói, pontosabban egy Christine Palermo nevű egyetemi hallgató és témavezetője, Thomas Gasiewicz. Az Amerikai Kémiai Társaság egyik folyóiratában beszámoltak arról, hogy a zöld tea különböző összetevői hogyan befolyásolják egy molekula működését, amely aktívvá tehet bizonyos rákkeltő géneket. Megállapították, hogy a zöld teában kétféle olyan anyag is van, amely gátolja a rák kialakulását támogató, ún. „AH" receptor működését, és ezzel a zöld tea daganatgátló hatásának eddig ismeretlen mechanizmusát fedezték fel. Laboratóriumban már egyetlen csésze teában is találtak annyi hatóanyagot, amely elegendő volt a kedvező hatás kimutatásához, ám ez valószínűleg nem jelenti azt, hogy ugyanannyi elég a működő emberi szervezetben is. Érdekes, hogy a zöld teának ezek az alkotórészei kémiai rokonságban állnak a brokkoli, a káposzta, a szőlő és a vörösbor ismert daganatgátló összetevőivel.

Statisztikai adatok alapján már évekkel ezelőtt kimutatták, hogy zöld teát rendszeresen fogyasztók között bizonyos daganatos betegségek ritkábban fordulnak elő, sőt a *Nature* számolt be azokról a kutatásokról, amelyek kimutatták, hogy a zöld tea bizonyos molekulái megkötik a sejteket roncsoló, aktív szabadgyököket, és ezzel rákellenes hatást fejtenek ki. A most felfedezett biokémiai folyamat azt bizonyítja, hogy a zöld tea legalább kétféle „rákellenes stratégiával" rendelkezik. Rendszeres fogyasztását egyébként évek óta ajánlják a dohányosoknak.

Palermo, Christine M, – Martin Hernando J. I. – Dertinger, S. D. – Kende A. S. – Gasiewicz T. A.: Identification of Potential Aryl Hydrocarbon Receptor Antagonists in Green Tea**.** Chemical Research in Toxicology, 16, **7**, 21 July 2003. 865–872.

G. J.

A VACSORA IS LEJÁTSZHATÓ SZÁMÍTÓGÉPEN

Japán kutatók ételszimulátort készítettek, és ezzel a „virtuális valóság" a többi érzékelés – a látás, a hallás, a szaglás, és a tapintás után, betört az ízlelés világába is. Az előkészületek során a fejlesztők lemérték és rögzítették, hogy egy-egy adott élelmiszer rágása közben milyen folyamatok játszódnak le a szájban. Ezeket az adatokat használja fel a szimulátor, amelynek gumi- vagy szövetborítású mechanikai részét a szájba véve rágni kell, és az ebben lévő apró motorok rágás közben ugyanolyan ellenállást fejtenek ki, mint a szimulált étel. A készülék vékony csövecskéken a program szerinti ízanyagokat fecskendez a nyelvre, miközben egy hangszórón az illető étel rágására jellemző hangok hallhatók. A kutatók már sokféle ételt szimuláltak, azt azonban még nem érték el, hogy annak illata is az orrba jusson.

Ezekről az eredményekről a *New Scientist Online* számolt be (www.newscientist.com) július 31-én a kaliforniai San Diegóban július 27-től 29-ig tartott SIGGRAPH 03 nevű, komputergrafikával és interaktivitással foglalkozó konferenciáról tudósítva.

Ananthaswamy, Anil: Virtual reality conquers sense of taste.
http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994006

G. J.

A ZENE BIOLÓGIAI ALAPJAI

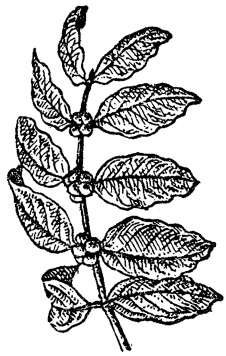
A zene szerkezeti alapjai biológiai okokra vezethetők vissza – állítja Dale Purves, az észak-karolinai Duke Egyetem munkatársa az egyik legnevesebb idegtudományi folyóirat hasábjain. Purves és kollégái angol nyelvű beszédek felvételeiből véletlenszerűen kiválasztottak több mint százezer 0,1 másodper-

ces részletet, és ezen rövid hangminták akusztikus analízisekor kiderült, hogy köztük a tizenkét fokozatú kromatikus zenei skála hangjainak megfelelő frekvenciák a leggyakoribbak. A vizsgálatok hasonló eredményre vezettek más nyelvek esetében is. Mindebből az következik, hogy az ember számára az a kellemes – azt tekinti zenének –, ha a saját hangképző-szervére jellemző frekvenciájú hangok kombinációját hallja.

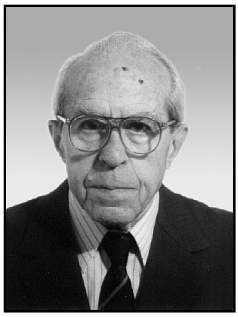
A kutatókat már évszázadok óta foglalkoztatja az a tény, hogy a különböző kultúrákban egymástól teljesen függetlenül kialakult tradicionális zenék mindig a tizenkét fokozatú kromatikus skálából használnak hangokat. (Például a kínai vagy a magyar zene ötöt, mások hetet.) Ennek magyarázatára különböző elméletek születtek, sokan matematikai szabályszerűségekkel indokolták ezt a csodát. A Duke Egyetem kutatói most azt mondják: azért váltak éppen ezek a legfontosabb zenei hangokká, mert az ember a saját maga által kiadott „legsikeresebb" hangokat hallgatja a legszívesebben.

Schwartz, David A. – Howe, Catherine Q. – Purves, Dale: The Statistical Structure of Human Speech Sounds Predicts Musical Universals. The Journal of Neuroscience. 23, 7160-7168.

G. J.



Megemlékezés



LÉVAI ANDRÁS
1908 – 2003

Életének 95. évében elhunyt Lévai András, az energetika tudós professzora, mérnökgenerációk tanítója. A tudóssal és a professzorral az elmúlt évszázad egyik nagy magyar mérnökegyénisége távozott közülünk. Lévai András 1908. december 22-én Oravicán született. Középiskolai tanulmányait a Temesvári Piarista Gimnáziumban, egyetemi tanulmányait a Grazi és a Bécsi Műegyetemen folytatta, 1931-ben szerzett gépészmérnöki oklevelet.

Ipari tevékenységét üzemmérnökként és energetikusként román és magyar ipartelepeken kezdte. Első igazi szárnybontása az volt, amikor a Weiss Manfréd Rt. üzemgazdasági osztályvezetőjeként úttörő megoldással – 100 bar nyomású újrahevítéses egységekkel megtervezte a Csepeli Erőmű rekonstrukcióját. Az erőmű és a villamosenergiarendszer fejlesztését több poszton irányította. 1945-50 között a Nehézipari Központ osztály- majd cégvezetője volt, szervezte az erőművek háború utáni helyreállítását és az együttműködő erőműrendszer létrehozását. 1950-ben megalapította az Erőmű Tervező Irodát, amelynek több mint egy évtizeden keresztül volt vezérigazgatója, majd 1962-67 között nehézipari miniszterhelyettesként irányította a hazai erőművek tervezését, a villamosenergia-rendszer fejlesztését és nemzetközi összeköttetésének kiépítését. Irányítása alatt épült az összes szénerőművünk, a 20 MW-ostól a 215 MW-os egységekig. Az erőművek főberendezéseit zömében a magyar energetikai gépgyártás szállíthatta. Az együttműködő erőműrendszer létrehozásával összhangban vitathatatlan érdemei voltak a rendszerhatások feltárásában és a népgazdasági szemlélet meghonosításában. A hazai atomenergia-program elindítója volt, már a Genfi Konferenciát követően 1955-56-ban számos előadásban és tanulmányban kijelölte az atomenergia várható szerepét és a követendő hazai utat. Illetékes miniszterhelyettesként ő készítette elő a Paksi Atomerőmű építésére vonatkozó magyar-szovjet államközi szerződést. Számos energetikai kérdésben tett kezdeményezéseket. Ezek közé tartozik a kapcsolt energiatermelés, amely aktív idejében sajnos a hazai szakkörökben erősen vitatott volt. A hő- és atomerőművek környezeti hatásainak átfogó feltárását akkor kezdte, amikor az még nem volt része a közgondolkodásnak. Sokat foglalkozott az energetika távlati tervezésével, a kimerülő energiakészletek energiatakarékos hasznosításával, és a megújuló energiák várható szerepével.

Széleskörű ipari tevékenysége és tapasztalata adott szilárd alapot sok évtizeden keresztül elhivatottan végzett oktatói tevékenységéhez. Rendkívül gazdag szakmai ismerettel előbb meghívott előadóként oktatott a Műegyetem Villamosmérnöki és Gépészmérnöki Karain, majd 1953-ban megalapította a Hőerőművek Tanszékét, amelyet negyedszázadon keresztül, nyugdíjba vonulásáig vezetett előbb fél, majd teljes állású professzorként. Munkatársai és hallgatói értékelték és tisztelték széleskörű és megalapozott szakmai

tudását és szervezőképességét. Szakemberként és emberként is példaképüknek tekintették. Egyetemi oktatóként kialakította a hőerőművek, az atomtechnika és a köréjük csoportosuló tárgyak egyetemi oktatásának programját. Hőerőművekkel foglalkozó szakés tankönyve több évtizeden keresztül az erőműves szakma és oktatás bibliája volt. Az új ismeretek oktatása mindig vonzotta, ennek szellemében indult el az atomenergetikai képzés, később az erőművek rendszer- és irányítástechnikai, majd környezetvédelmi kérdéseinek oktatása. A gyakorlati oktatásra nagy gondot fordított. Több laborépítést kezdeményezett, nélküle ma az egyetemnek, illetve a hazai felsőoktatásnak nem lenne tanreaktora. Egyetemi oktatóként iskolát alapított. Nevéhez fűződik az erőművek műszaki-gazdasági szemléletének korai kidolgozása és következetes alkalmazása. Az élet csak később igazolta, hogy az energetikus gépészmérnöknek mennyire szüksége van a megfelelő gazdasági ismeretekre és szemléletre. Meghatározó szerepe volt abban, hogy a műszaki-gazdasági követelmények mellett környezetvédelmi szempontok is fokozatosan teret nyerjenek az energetikai létesítmények tervezésében, építésében, üzemeltetésében.

Tudományos tevékenysége az erőművek és erőműrendszerek gépészeti, gazdasági, rendszertechnikai és környezeti vizsgálataira vonatkozott. Tudományos eredményeinek hasznosságát az fejezi ki legjobban, hogy ipari tevékenysége során azok nagy része azonnal beépült a magyar erőművek és erőműrendszer fejlesztésébe. Könyvei és jegyzetei mellett száznál több publikációja fémjelezte tudományos tevékenységét, és szolgálta a magyar energetikát. Magasszintű tudományos szervezőtevékenységet végzett az MTA Műszaki Tudományok Osztálya elnökhelyetteseként és elnökeként, az MTA Áramlás- és Hőtechnikai Bizottság illetve Energetikai Bizottság elnökeként, a WEC Magyar Nemzeti Bizottság elnökeként, a BME tudományos rektorhelyetteseként, de számos magas szintű szakmai és tudományos bizottságban is tisztséget viselt. A műszaki tudomány kandidátusa fokozatot 1950-ben, a műszaki tudomány doktora fokozatot 1957-ben nyerte el. A MTA levelező tagjává 1962-ben, rendes tagjává 1973-ban választották.

Kimagasló tevékenységéért számos állami kitüntetésben részesült: Magyar Köztársasági Érdemérem (1948), Kossuth-díj (1949), Szocialista Munkáért Érdemérem (1957), Munka Érdemrend (1968), Szocialista Magyarországért Érdemérem (1978), Magyar Népköztársaság Csillagrendje (1988) és Széchenyi-díj. A Moszkvai Energetikai Intézet (1975) és a Budapesti Műszaki Egyetem díszdoktora. A Budapesti Műszaki Egyetem professor emeritusa.

Lévai professzor gazdag életútja, egész életét megszabó etikus magatartása, a nemzetközi feltételeket is figyelembe vevő, ugyanakkor mindig nemzetben gondolkodó személyisége példaként áll előttünk, amely eligazít az értékzavarokkal küzdő társadalmunkban. Példaképe a szakembernek, aki széles körű elméleti és gyakorlati ismeretekkel felvértezve, töretlen szívóssággal, megértő toleranciával és tisztességes eszközökkel éri el célját, a magyar energetika fejlesztését. Példaképe az ipari vezetőnek, aki formálva a közvéleményt és támaszkodva rá, a magyar energetika nagy kérdéseiben hozott hosszú távra megalapozott döntéseket. Példája a tudós professzornak, aki iskolát alapított, s aki növelte a magyar energetikai felsőoktatás hírnevét határainkon belül és azon túl is. Példaképe a lelkiekben és érzelmekben gazdag embernek.

Tanítványaként és munkatársaként sokan tekintjük mesterünknek. Gazdag szakmai és emberi örökségét tisztelettel és szeretettel megőrizzük!

Büki Gergely
a műsz. tud. doktora
(BME)

Csom Gyula
a műsz. tud. doktora
professor emeritus (BME)

Könyvszemle

Berend T. Iván: Kisiklott történelem – Közép- és Kelet-Európa a hosszú 19. században

Jelen könyv a szerzőnek a Közép- és Kelet-Európa 19-20. századi komplex történetét feldolgozó munkái sorában a megjelenés idejét tekintve a trilógia 3., a kronológia alapján az első része. A korábban megjelent két könyv a 20. század első, illetve második felét öleli fel.

A könyv címe alapján három kérdés fogalmazódik meg az olvasóban. Elsőként, mit ért a szerző a „kisiklott történelem" kifejezésen, másrészt mit takar a Közép- és Kelet-Európa fogalom, s végül a legkönnyebben megválaszolható és legismertebb: a hosszú 19. század kifejezés. Ez utóbbi Eric Hobsbawm nyomán közismert, Berend T. Iván Ránki Györggyel írt munkáiban régóta használja. A hosszú 19. század a 18–19. század végének kettős forradalmától – az angol ipari forradalom, valamint a francia polgári forradalom – az első világháborúig terjedő időszakot öleli fel.

A kettős forradalom Közép- és Kelet-Európa országainak történetét is alapvetően meghatározta. A 19. században erősödtek fel azok, a már korábban is jelentkező törekvések, amelyek Nyugat-Európa példájának követésére, a modernizáció megvalósítására, azok feltételeinek megteremtésére, vagyis a Nyugathoz történő felzárkózásra irányultak.

A könyv döntően ezekkel a kérdésekkel foglalkozik, sokrétűen és sokoldalúan. A monográfia a térség történetének előzményeként összegezést ad Nyugat-, valamint Közép- és Kelet-Európa kora újkortól kezdődő időszakáról, azaz a 16-18. század gazdasági, társadalmi és politikai fejlődésének eltéréséről is. Nyugat-Európában, mindenekelőtt Angliában és Hollandiában, gyors fejlődés következett be, míg az európai „perifériákon" stagnálás és viszonylagos hanyatlás figyelhető meg.

A 16-18. század a pangás időszaka, a felzárkózás illetve közelítés a hosszú 19. századra esik.

Ami a vizsgált térséget illeti, ez – miként a 20. századot tárgyaló másik két könyve is – a Németország és Oroszország közötti területre irányul, hozzátéve, hogy a „Közép- és Kelet-Európa régió elnevezés természetesen absztrakció, hasonlóan az ‚Európa', az ‚északi államok', a ‚mediterrán Európa' és a ‚Közel-Kelet' fogalmakhoz".

A régión belüli jelentős fejlődésbeli különbségekre a monográfia szinte minden egyes vizsgálati szempontnál utal, s azokat messzemenően figyelembe veszi. Közép- és Kelet-Európa legalább két zónára bontható: a közép-európai, illetve az orosz és balkáni területre. A nyugati zónára (Lengyelország, a balti államok, Csehország, Magyarország és Horvátország) erős hatást gyakorolt a Nyugat, míg a keleti zóna (Oroszország és a Balkán) nagyon hosszú időn át elszigetelt maradt a Nyugattól, „megőrizve a magántulajdon hiányát, és fenntartva a közösségi rendszert a jelenkor korai időszakáig, vagy még tovább".

Melyek azok a közös vonások, amelyek indokolják – a számos különbség ellenére is – az egységes régióként való minősítést?

Mindenekelőtt a feudális viszonyok már említett megmerevedése, a városfejlődés stagnálása. Valamennyi e térségbe tartozó országra érvényes a nemzeti függetlenség hiánya, a többnemzetiségűség, a kevert népesség. Az összes közép-kelet-európai ország az újkor kezdetének századaiban „elvesztette független államiságát, és beolvadt a hatalmas, jobbára despotikus soknemzetiségű birodalmakba. A 18. század végén az egész térség három konzervatív birodalomhoz tartozott: a törökhöz, az oroszhoz és a Habsburghoz".

A 19. század története a térség országaiban a nemzeti függetlenségért, a polgári átalakulásért, a Nyugathoz való felzárkózás megvalósításáért folytatott küzdelmek története.

Ehhez mindenekelőtt a nemzeti identitásuk megerősítésére, nemegy esetben kialakítására volt szükség, amiben kiemelkedő szerepe volt a romantikának. Isaiah Berlin a romantikát „a kor két nagy forradalmával állította egy sorba, kijelentve, hogy jelentősége és tartós következményei nem voltak kevésbé meghatározóak".

E soknemzetiségű országokban a nemzetállamok megteremtéséért folytatott küzdelemben kiemelkedő jelentőségű volt a nemzeti nyelv megteremtése, az addig elkülönült hivatali és köznyelvvel szemben. Ez az időszak a nemzeti irodalom, zene és művészet születésének ideje is. A nemzeti tudat erősítésében fontos szerepük volt a kulturális intézményeknek (színházak, múzeumok, könyvtárak), valamint a sajtónak, kávéházaknak, stb.

E röviden jelzett – a könyvben azonban részletesen tárgyalt – tényezők élesztették a függetlenségi törekvéseket, amelyek felkelésekhez vezettek (Lengyelország, Magyarország, a balkáni országok függetlenségi harcai). Ezzel egyidejűleg fellángoltak a soknemzetiségű országok nemzetiségeinek önállósodási törekvései. Velük párhuzamosan a korábban pozitív „nacionalizmus 1848-ban és a 19. század második felében… fokozatosan társadalmilag konzervatívvá, kirekesztővé vált", nemcsak Közép- és Kelet-Európában, hanem 1848 folyamán egész Európában – mutat rá a szerző. E témakör lezárásaként megállapítja: e térség országainak 19. századi felkelései, forradalmai révén, bár ezek zömét leverték, kompromisszumokkal sikerült az autonómia elemeit elnyerni, nyugati stílusú jog- és intézményrendszereket meghonosítani, amelyek azonban csak részben és egy évszázados késéssel valósultak igazán meg.

A 19. század második felében, nem kis mértékben a nyugati országok iparosításának hatásaként is, jelentős gazdasági fejlődés következett be a térségben. E tekintetben azonban az egyes országok között nagy különbségek voltak, amit a monográfia alapos részletességgel tárgyal.

A gazdaság fejlettségének szintje rányomta bélyegét a társadalom szerkezetére is. A vezető nyugati országok nagypolgársága életmódjában, szokásaiban a történelmi arisztokráciát utánozta. „Míg az *ancien régime* maradványai a 19. század nagy részében Nyugat-Európában is tovább éltek, Közép- és Kelet-Európa egyenesen a régi társadalmak rezervátuma maradt" – mutat rá a szerző. Fennmaradtak a nemzeti elit pozíciói, az iparosodás lassú előrehaladása következtében megmaradt a parasztság túlsúlya és a munkásság alacsony aránya. A politikai hatalmat továbbra is a korábbi nemesség birtokolta. A polgárság és a modern középosztály számban is kicsi, a politikai hatalomban érdemleges szerepük nincs.

A balkáni országok társadalmának legfőbb sajátossága a nemzeti elit teljes hiánya, a vezető szerepet a katonai és a köztisztviselői osztály tagjai töltik be. A nagybirtok domináns szerepe és vele együtt gazdasági és politikai hatalma továbbra is fennmaradt (a cseh területen, Magyarországon, Horvát-

országban, Bosznia-Hercegovinában és Romániában). Ugyancsak részletesen tárgyalja a könyv a lengyel szlachta és a magyar dzsentrik helyzetét.

Kisebb súllyal szerepel az új elit ábrázolása, ezen belül részletesebb a polgárság etnikai eredetének vizsgálata az egyes országokban, különös tekintettel a „zsidókérdésre", s ezzel összefüggésben az antiszemitizmusra. A modernizáció jelentős változásokat eredményezett a családok életében is, ebben a keretben kerül sor a térség családi viszonyainak, bennük a nők helyzetének differenciált bemutatására.

A könyv fő mondanivalóját összegező megállapítások a politikai rendszert tárgyaló fejezetben olvashatók. Modern demokráciák csak a kontinens gazdag, iparosodott országaiban alakultak ki. Az elmaradott társadalmi, gazdasági viszonyok között élő Közép- és Kelet-Európában a politikai elit és az értelmiség törekedett a nyugati példa követésére. A térség nemzeteinek fő célja a Nyugathoz való csatlakozás volt, és a törekvés számos vonásban érvényesült is, de a nem iparosodott független nemzetállamiságért küzdő országok képtelenek voltak követni ezt az utat. „Mind az államok, mind kormányaik tradicionálisan autokratikusak voltak, és autokratikusak is maradtak, a törvények és a polgárjogok értelmezésében és gyakorlatában… a nacionalizmus áthatotta a politikát is, és a külpolitika vezérmotívuma lett."

A 19. századon végigvonuló törekvések eredményeként megszületett függetlenség sem oltotta ki a nemzeti gyűlölködést – állapítja meg a szerző. „Paradox módon az autokratikus és elnyomó soknemzetiségű birodalmak ellen küzdő elnyomott nemzetek, miután elnyerték szabadságukat, az általuk ismert egyetlen mintát követték, és hasonlóan autoriter, korrupt és bürokratikus államokat építettek ki."

Jelentős súlyt kap e fejezetben az expanzionizmus tárgyalása, amit az egyes országok nemzetiségeivel szembeni megnyilvánulások formáira is kiterjeszt a monográfia. E vonatkozásban elsősorban a magyar kormányok nemzetiségi politikájának részletes tárgyalását és megállapításait kell kiemelni. A kormányok nacionalista politikájának keretében részletesen tárgyalja az egyes pártok, mozgalmak politikáját, különös tekintettel a század utolsó negyedében felerősödött antiszemitizmusra. Többek között megállapítja: a politikai antiszemitizmus, amely „ekkoriban vert gyökeret Magyarországon… bár az ideológia és az érvek terén az előkészítés megtörtént – nem vált a magyar nacionalizmus integráns részévé".

Az itt tárgyalt kérdésekben összegeződik az Előszóban megfogalmazott megállapítás lényege, miszerint „ez az időszak – vagyis a hosszú 19. század – …Közép- és Kelet-Európában történelmi drámákat hozott magával: részben sikeres, részben kudarcot vallott politikai, társadalmi és gazdasági kísérleteket. A későbbi felkelések, keserű gyűlölködések és az agresszív nacionalizmus magvait ezek alatt az évek alatt vetették el, amikor a térség történelme kisiklott."

E kisiklott történelmi korszakként jellemzett évszázad képezi e térség két évszázados történetét feldolgozó trilógia első részét. Az egyes kötetek címét tekintve, a ***Kisiklott történelem*** kevésbé tűnik adekvátnak, mint a második és harmadik köteté. E század ebben a térségben is a modernizáció, a felzárkózás megindulásának az időszaka volt, még ha az egyes országokban jelentős eltérésekkel valósult is meg. Kérdéses, hogy a szélsőséges nacionalista nézetek alapján, amelyek ugyancsak eltérő intenzitással jelentkeztek az egyes országokban, lehet-e a térség egészére alkalmazni e fogalmat, hiszen szélsőséges etnikai és vallási nézetek és ellenségeskedések Európa e térségen kívüli országaiban is megfigyelhetők voltak.

Természetesen nem várható el, hogy a szerző az egyes vitatott kérdésekkel kapcso-

latos álláspontokat e kötet keretein belül ismertesse, még kevésbé, hogy azokkal polemizáljon. Ezek felsorolása még a magyar történelmi irodalmat tekintve is szinte egy újabb könyvet igényelne, nyilván hasonló a helyzet más országokra vonatkozóan is. Néhány esetben találkozunk ilyen utalásokkal, de indokolt lett volna ezek számát legalább lábjegyzet szintjén szaporítani (elkanyarodás, nemzeti kérdés, polgárosodás, asszimiláció, stb.).

Magyar kiadású könyvről lévén szó, ugyancsak indokoltnak tűnne a magyar történelemmel kapcsolatos részek tárgyalásánál a hazai szerzők témakörbe vágó munkái közül többet említeni, ez most eléggé esetlegesnek tűnik.

Mindazok, akik Közép- és Kelet-Európa 19. századi történetét a maga komplexitásában kívánják megismerni, e könyvből rendszerezett, összefüggő ismeretekhez juthatnak. *(Berend T. Iván: Kisiklott történelem. Közép- és Kelet-Európa a hosszú 19. században. História könyvtár. Monográfiák. MTA Történettudományi Intézete, Budapest, 2003. 277 p.)*

Szuhay Miklós
a történettudomány doktora

Papp Sándor: Biogeokémia – Körfolyamatok a természetben, Fagyöngy civilizáció

A tudományágak a 20. században elkülönülve saját útjukat járták. Ezzel párhuzamosan a tudományos kutatás meghatározó módszerévé a redukcionizmus vált, amelynek alapvető ismérve a probléma részekre bontása, a részfolyamatok egymástól független értelmezése. A redukcionista szemléletmód hatalmas eredményeket hozott, kialakultak a specialisták, akik a Természet jelenségeinek meglehetősen szűk területével foglalkoznak.

A Föld megismerése azonban egyre világosabbá tette, hogy bolygónk összefüggő rendszer, működését nem érthetjük meg, ha folyamatait elszigetelten kezeljük. Az is nyilvánvalóvá vált, hogy a Föld „élettelen" és „élő" tartományai a bolygó története során állandó kölcsönhatásban fejlődtek: a geoszférák (légkör, hidroszféra, litoszféra, stb.) és a bioszféra közel sem függetlenek egymástól. A bolygó egységét legszembetűnőbben a Természet nagy anyagáramlása, a biogeokémiai körforgalom jeleníti meg, amely állandóan anyagot szállít egyik földi szférából a másikba. Ez az anyagáramlás teszi lehetővé a földi életet, tartja egyensúlyban a légkör összetételét és ezen keresztül a legfontosabb környezetei elemegyüttest, az éghajlatot. A biogeokémiai kutatások azért kerültek az érdeklődés előterébe, mivel az emberi tevékenység akarva (például műtrágyázás) vagy akaratlanul (például szennyezőanyagok kibocsátása) megváltoztatja ezt a nagy anyagciklust.

A redukcionizmus módszerein alapuló tudományos világunkban nem okvetlenül sikertörténet, ha valaki, szakítva az eddigi hagyományokkal, megpróbál a földi környezet globális folyamataival foglalkozni. Hazai vonatkozásban Papp Sándor ezek közé az úttörők közé tartozik. Jó nevű szervetlen kémikusi múltjától bizonyos értelemben elszakadva, figyelmét egyre inkább a környezeti kémia felé fordította. Az „irányváltás" eredménye az első magyar nyelvű *Környezeti kémia* tankönyv lett, amely a német Rolf Kümmel társszerzőségével 1992-ben látott napvilágot. Papp Sándor és Rolf Kümmel kötete a hazai környezettudományi oktatás alapvető művévé vált. Nagymértékben elősegítette a témakör hazai alap- és egyetemi doktori szintű oktatását, elsősorban a Veszprémi Egyetemen, de más felsőoktatási intézményekben is. Részben az egyetemi oktatás gyakorlatában formálódott

az a gondolat, hogy a környezeti kémia, általánosabban szólva a környezettudomány lényegét a biogeokémia alkotja. Jelen könyv a szerző többéves oktatási munkájának szintézise, amely alapokat nyújt a környezettudományi oktatás további elmélyítéséhez.

A 276 oldalas mű bevezetésből, négy fejezetből, irodalomjegyzékből és tárgymutatóból áll. Az első fejezet *(A föld, mint reakciótér)* alapvető célja a különböző környezeti tartományok (légkör, hidroszféra, litoszféra) rövid leírása. Az erre épült második az *Anyagáramok és kémiai átalakulása a globális reakciótérben* címet viseli. A fejezetek szakmai szempontból elfogadhatóak, bár a rövidségre való törekvés (főleg az első fejezetnél) időnként már a megértés rovására megy. Jó lenne továbbá, ha a magyar nyelvű tudományos irodalomban néhány helyesírási és elnevezési kérdésben megállapodás születne (például bolygónk nevét kis, vagy nagybetűvel kell-e írni). Talán arra is törekedni lehetne (ez nem a könyv kritikája, hanem általános megjegyzés), hogy az atmoszféra, hidroszféra, litoszféra kifejezésekre megtaláljuk a magyar változatot. Az „atmoszférát" mindenesetre a légkörrel foglalkozó szakemberek egyértelműen „légkörnek" nevezik. Végül bonyodalmakat okoz a „részecske" szó is. A fizikában ez a szó atomi részecskét jelent, míg a levegőkémiában aeroszol részecskét. Papp Sándor időnként a „kémiai formát" (angol kifejezéssel *species*) is „részecskének" nevezi.

A második fejezetben talán több teret lehetett volna szentelni a biogeokémiai ciklusok modellezése kérdéseinek: milyen elvi módszerek állnak rendelkezésünkre, hogy leírjuk ezeket a folyamatokat. „Az advektív transzport" (2.1.1. rész) részletesebb kifejtést igényelne. A kondenzációval és kristályosodással foglalkozó oldalakról hiányzik a kérdések nukleációs alapjainak tárgyalása, ugyanakkor a kémiai reakciók és kinetika összefoglalása rövidsége ellenére is igen jól sikerült.

A harmadik fejezet *(Az elemek biogeokémiai körforgása)* adja a könyv gerincét. A szén, nitrogén, kén és foszfor körforgalmának bemutatása a kötet értékei közé tartozik. Természetesen kisebb megjegyzéseket minden elem esetén tehetünk, ezek azonban nem vonnak le semmit a fejezet értékeiből. A megjegyzések ugyanis egyes fluxusok nagyságára vonatkoznak, amelyeket illetően nincs általánosan elfogadott megállapodás az irodalomban. Ennél lényegesebb, hogy a 3.5 alfejezet *(Az oxigén körforgása)* meglehetősen rövidre sikerült. A szabad oxigén a földi környezet egyik legfontosabb molekulája. Ennek megfelelően talán részletesebben is lehetett volna tárgyalni, esetleg röviden vázolni a belőle keletkező magaslégköri ózon körforgalmát is (erre egyébként a 4. fejezetben részben sor kerül). A legnagyobb hiányérzetet az olvasóban azonban az kelti, hogy teljesen kimaradt a víz körforgalmának bemutatása, illetve a víz és más nyomanyagok ciklusa kölcsönhatásainak taglalása. Ezzel kapcsolatban arra is rá lehetett volna részletesebben mutatni, hogy a felhővízben számos olyan kémiai reakció zajlik le, amely nagy szerepet játszik az egyes elemek/vegyületek légköri körforgalmának szabályozásában.

A 3.6 alfejezet nagyszerű összefoglalása *A fémek környezeti kémiájá*nak. Itt domborodik ki talán legmarkánsabban a szerző kémiai tudása, a szervetlen kémiai kutatásokon felnőtt kutató kiváló hozzáértése. A fémek kémiai viselkedését, illetve környezeti hatásait alapvetően leggyakoribb vegyületeik oldhatósága, redoxisajátsága, komplexképző hajlama és biológiai felvehetősége határozza meg. E folyamatok szerepét a körforgalom alakításában az alfejezetből tíz fémre ismerheti meg az olvasó. Így követheti a cink, kadmium, higany, ón, ólom, arzén, króm, mangán, vas és réz környezeti ciklusát.

A 4. fejezetben az emberi tevékenységnek az elemek biogeokémiai körforgalmára gyakorolt hatásairól olvashatunk. Ide olyan

fontos kérdések kerültek, mint a globális éghajlatváltozás, a savas ülepedés, a magaslégköri ózonciklus, a fotokémiai füstköd és az eutrofizáció. Az éghajlatváltozás tárgyalásakor célszerű lett volna felhasználni az ENSZ által létrehozott *International Panel on Climate Change* (Kormányközi Klímaváltozási Bizottság) kiadványait és röviden bemutatni a Bizottság következtetéseit. A savas ülepedés bemutatásánál talán utalni lehetett volna az utóbbi huszonöt évben bekövetkezett kedvező változásokra (legalábbis Európában és Észak-Amerikában), míg az eutrofizációnál röviden a Balaton problémáira.

A könyvet *A földi élet és a biogeokémiai körfolyamatok* című alfejezet zárja, amelynek végén Papp Sándor helyesen megjegyzi, hogy az ökológiai rendszerek megismerésében, beleértve az elemek közötti kölcsönhatásokat és visszacsatolási folyamatokat, még csak a kezdeti lépéseket tettük meg. További fejlődést ezen a területen a szerző a környezettudományi kutatások általánossá válásától vár, amelyek eredményei elő fogják segíteni természeti környezetünk folyamatainak mélyebb megértését. E sorok írójának meggyőződése, hogy ilyen jellegű könyvek, mint a jelen *Biogeokémia,* hozzájárulnak a környezeti kutatások hazai fejlődéséhez, a környezet jobb megértéséhez, az ember és környezete kapcsolatának tudományos alapokon történő feltárásához. *(Papp Sándor: Biogeokémia – Körfolyamatok a természetben. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2002, 276 p.)*

*

Ritka az a természettudományos kutató, aki laboratóriumi kísérleteitől, a természet megfigyelésétől, eredményei értékelésétől eljut tevékenysége filozófiai szintű kérdéseiig. A 20. században főleg a fizika művelői közül találunk erre példákat. Papp Sándor különösen ritka eset, hiszen természettudományos elmélyültségéről, valamint esszéírói vénájáról két, egyszerre megjelent kötetből győződhetünk meg.

Papp Sándor tudományos pályáját mint redukcionista laboratóriumi vegyész kezdte, majd kilépett a Természetbe, és eljutott a környezetet globális egységében tárgyaló biogeokémiáig. A második lépésben figyelme egyre inkább a környezet és az ember kapcsolatának általános értékelése felé fordult és egyre több tanulmányt publikált az emberi társadalom, gazdaság és természet (hármas nagyrendszer) bonyolult működési mechanizmusáról. Jelen kötet ezeket az írásait köti csokorba.

Szerző a Föld bolygót a Titanic óceánjáróhoz hasonlítja, amelynek utasai meg voltak győződve hajójuk biztonságáról, és a baj bekövetkezte után sem vették először komolyan a leendő katasztrófát. A Földön ma az emberiség, elsősorban a „boldog egymilliárd", élősdi módjára él, mint fagyöngy a fákon. A fagyöngy szépségének, az emberi civilizáció eredményei élvezetének ára van. Egyre jobban kimerülnek erőforrásaink, a környezetbe egyre több technológiai és fogyasztási hulladékot juttatunk. Egyre elkerülhetetlenebb, hogy tevékenységünk a környezetben kimutatható változásokat okozzon. „Az ember fáj a Földnek", idézi Papp Sándor Vörösmarty kissé pesszimista sorait.

A ma emberének a lehető legpontosabban ismernie kell, hogy honnan jövünk, tudatában kell lennie az elődöktől kapott örökségünknek, hiszen csak így mérheti fel, hogy merre is tartunk. Közvetlen örökségünk a 20. század, elsősorban annak második fele, a növekedés százada volt. A Föld lakóinak száma több mint háromszorosára, a világgazdaság produktuma hússzorosára, a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása harmincszorosára növekedett, annak ellenére, hogy ezt a fejlődésnek nevezett folyamatot időnként válságok szakították meg. Ezzel párhuzamosan egyre jelentősebb lett a specializáció, az ember „énközpontú" lénnyé vált, mint a

kötet elején olvashatjuk. Megváltozott a szabadság koncepciója, a szabadság létcéllá, végső értékké vált. Mindehhez nem társult az erkölcsi tökéletesedés, pedig a jövőt nem csak racionálisan, hanem hittel és bölcsességgel kell(kellene) megterveznünk.

Egyetérthetünk a szerzővel, hogy a jövő befolyásolásának egyik legfontosabb módja az oktatás-nevelés. Ezzel kapcsolatban Papp Sándor, mint nagy tapasztalatokkal rendelkező egyetemi oktató, érdekes esszében tárgyalja az európai egyetemi oktatás módjait, a várható változásokat és azok hatásait. Egyebek között megállapítja: a probléma egyik fő forrása, hogy mélyül a szakadék a növekvő ismeretanyag és a követelmények lehetséges illetve kívánatos színvonala között. Felveti a kérdést, hogy ki, kit, mit és hogyan tanítson. Javasolja, hogy az oktatás vezérfonala ne csak a szűk prakticizmus legyen. A fiataloknak el kell sajátítaniuk a hivatástudatot, az oktatatást át kell, hogy járja az esztétikai minőség.

Korunk össztársadalmi válságának egyik oka, hogy egy meghaladott tudományos nézetet, a kartéziánus-newtoni mechanisztikus világképet akarunk a valóságra alkalmazni. Ennek lényege az analitikus, induktív és redukcionista szemléletmód, amely nem alkalmas a globális összefüggéseket felmutató világunk értelmezésére. A világ értelmezéséhez új komplex ökológiai látásmód szükséges, amelyben az emberiség fejlődését kulturális fejlődésének menetébe helyezzük. Nem szabad hagyni, mint ez a múltban történt, hogy az ember „kigondolkodja" magát a természeti környezet koevolúciós folyamataiból.

A szerző, Petőfit idézve, társadalmunk globális látleletét adja ***A bőség kosara, a jog asztala és a szellem napvilága*** című írásában. Megállapítja, hogy a ***Homo sapiens*** még ma is messze van a költő által elképzelt vágyálomtól. Végül a kötetet érdekes eszmefuttatás zárja a globális felmelegedésről, beleértve a kérdéskör gazdasági-politikai vonatkozásait.

Talán ebből a pár sorból is kitűnik, hogy gondolatébresztő, érdekes kötetről van szó. Elolvasását, a felvetett kérdések és az esetleges válaszok újragondolását mindenkinek ajánlhatjuk, akik érdeklődnek az emberiség egyik nagy problémája, a környezeti kihívás eszmei kérdései iránt. ***(Papp Sándor: Fagyöngy civilizáció. Új Horizont, Veszprém, 2002, 208 p.)***

Mészáros Ernő
az MTA rendes tagja

Térképtudományi tanulmányok

A tanulmánykötet egy 1956 óta megjelenő szakmai sorozatkiadványnak a legfrissebb, immár 12. könyve. Az olvasó tizenhét cikket talál a legutóbbi gyűjteményben összesen tizenöt szerzőtől. A témakörök átfogják mind a hagyományos, mind a legújabb kartográfia kutatási területeit. A kötet szerkezetének felépítése, a tanulmányok sorrendje is ezt az ívet tükrözi, amely hosszú ideje markánsan jelen van az Eötvös Loránd Tudományegyetem Térképtudományi Tanszékének oktatási és kutatási programjában.

A cikkek közül négy angol nyelvű, és ezek mindegyike rövid magyar nyelvű tartalmi kivonatot is tartalmaz. (A logika azt diktálta volna, hogy a magyar nyelvű tanulmányokat – és ne csak egyet – következetesen idegen nyelvű összefoglaló is bevezesse.) Az írásokat bőven illusztrálják térképek, táblázatok, vagy éppen matematikai képletek. Kifejezetten örvendetes és a jövőre nézve biztató, hogy Klinghammer István mint szerkesztő (és tanszékvezető) úgy állította össze a kiadványt, hogy a szerzők fele olyan doktorandusz hallgató, pályakezdő térképész, akik érdeklődési körükkel a szakma minden kutatási irányát képviselik.

Klinghammer István jegyzi a Studia Cartologica nyitó tanulmányát *(Kartográfia – tudomány-e a térképkészítés?)*, amelyben azt tekinti át a széles nemzetközi szakirodalom alapján, mikor mi tette és mi teszi a jövőben is a kartográfiát tudománnyá. Az elméleti és tudománytörténeti választ a szerző, a konkrét választ az ezt követő színvonalas cikkek adják meg. Tekintsük át ezeket tematikus csoportosításban.

Három tanulmány foglalkozik a vetülettan kérdéseivel, elsősorban az egész Föld ábrázolásának optimális vetületeivel (Györffy János, Juhász Péter). A vetülettani kutatás felismerte a számítástechnika nyújtotta előnyöket, és – a sokszor emlegetett globalizáció hatásaként – különösen a félgömbnél nagyobb területek optimális leképezésének elemzése lendült fel. Közismert, minden nép érzékeny arra, hogy országának térképi megjelenítése ne legyen torz, mert az hamis képet adhat gazdaságáról, népességéről, természeti viszonyairól stb.

A domborzatábrázolás, kitüntetetten a tenger alatti és partközeli formák generalizálásának, illetve multimédiás bemutatásának módjait két cikk taglalja (Dutkó András, Márton Mátyás). A téma fontosságát indokolja, hogy a Föld felületének legnagyobb részét tenger borítja. A gazdasági globalizáció és a környezetvédelem a tengereknek – a tengerfenéken lévő ásványkincseknek, a vízi élővilágnak – egyre nagyobb figyelmet szentel. Ezért nagyon fontos a tengerek és part közeli területek szemléletes ábrázolása, az azonosítás érdekében pedig a koordinátákon túlmenően a hivatkozások egységesítése.

A kartográfia elválaszthatatlan a földrajzi felfedezésektől, az utazásoktól és a tudományos expedíciók munkájától. Két jeles magyar Afrika-kutató, Magyar László és Almásy László térképezési eredményeit értékeli egy-egy tanulmányban Nemerkényi Zsombor és Török Zsolt. Itt jegyzem meg, hogy a tanszékvezető és jelen sorok írója részt vett 2001-ben az Egyiptomi Földrajzi Társaság meghívására a magyar Afrika-kutatást bemutató kairói kiállítás megnyitásán. Jólesett a helyszínen is meggyőződni arról, hogy a magyar geográfusok, felfedezők és térképészek eredményeit tisztelik és számon tartják Egyiptomban.

Érdekes tematikus térképek készítésével, illetve ábrázolási módszereikkel foglalkozik több tanulmány. A népességszerkezet, a repülőterek, vagy a halak tartózkodási helyének újszerű térképi bemutatása is jelzi a Térképtudományi Tanszék fiatal doktoranduszainak (Bartos-Elekes Zsombor, Varga Gábor és Pődör Andrea) sokoldalú érdeklődését.

A névrajzi kutatás, az alkalmazott nyelvészet speciális területe is határozottan jelen van a tanszéken: egy cikk az utóbbi jó száz év magyar névhasználatának változásaival foglalkozik (Faragó Imre), míg egy másik tanulmány szokatlan irányból közelíti a témát: a magyar természetföldrajzi nevek használatát vizsgálja az angol nyelvű irodalomban (Gercsák Gábor). A kartográfia újabb keletű területeit és alkalmazásait két cikk képviseli: az egyikben Zentai László visszatekint az első magyar digitális térkép készítésére, míg Kovács Béla egy helymeghatározó rendszer működését ismerteti.

Mivel a tanszék elsősorban oktatási-képzési feladatot lát el, természetes, hogy a tanulmánykötetben a módszertani kérdések is jelen vannak. Az egyik cikk történelmi távlatból értékeli Honterus 460 évvel ezelőtt megjelent földrajzkönyvét és iskolai atlaszát (Klinghammer István). Honterus munkája 150 évig hatott egész Európában, és igazi „uniós" tankönyv volt. A másik cikk a kartográfiaoktatás webes lehetőségeit elemzi a földrajz tantárgyon belül az alsóbb iskolai osztályok számára (José Jesús Reyes Nuñez).

A közölt írások kiváló keresztmetszetet adnak a Térképtudományi Tanszék szakmai munkájáról, valamint szerteágazó, több tudo-

mányterület határait is érintő kutatási érdeklődéséről. A kötetekről általános ismertető található a tanszék honlapján: http://lazarus.elte.hu/hun/digkonyv/sc/sc-start.htm.*(Studia Cartologica.ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2002,185 o.)*

Gercsák Gábor
PhD, egy. docens (ELTE)

Tibor Fényes: Structure of Atomic Nuclei

A könyv az atommag kis gerjesztési energiákon megfigyelhető viselkedését, szerkezetét tárgyalja, az egyedi nívókra felbontható, néhány MeV-ig terjedő tartományban. Kevés kutatónak adatik meg, hogy kutatási területéről monográfiát írjon. A szerző a szakma avatott művelője, negyvenéves kutatómunkájának (és kutatócsoportjának) eredményeivel a háttérben. A ma már félelmetesre duzzadt, igen szerteágazó irodalom mellett a jelenségek szisztematikus csoportosítása és értelmezése heroikus vállalkozásnak bizonyult.

A könyv óriási anyagot ölel fel, nem kevésbé kiadós terjedelemben. A több mint hétszáz oldalas könyv 835 irodalmi hivatkozást tartalmaz. A kísérleti és elméleti egyoldalúságokkal szemben sokféle érdeklődést elégít ki. Az általános módszerek mellett konkrét egyedi eredményeket is bemutat, bőven merítve az alkalmazásokból. A vállalkozás alkalmat teremtett arra, hogy eddig csak folyóiratok hasábjain található témák is kézikönyvbe kerüljenek. A könyv a kisenergiájú magfizika, pontosabban magszerkezet iránt érdeklődőknek tizenkét fejezetben nyújt részletes és gyakorlatilag jól használható áttekintést, anélkül, hogy elveszne a részletekben, vagy receptkönyvvé válna. A valóban hasznos képletek azonban nem maradnak ki.

Az atommag szerkezetének leírására két alapvető megközelítés alakult ki, melyek egészen a kezdetekig nyúlnak vissza; mindkettő tapasztalati tényeken nyugszik. Az egyik, a klasszikus folyadékcseppet idéző – a hasadás magyarázatára például jól bevált – kezdeti elképzelés, melynek leszármazottai a mag kollektív mozgásformáinak fenomenológiai modelljei. A másik, az atomi elektronburok szerkezetének analógiájára felállított héjmodell, amely értelmezni tudta a különösen stabilis, ún. mágikus nukleonszámú magok létét. Ez utóbbi típusú modellek a nukleon-nukleon kölcsönhatás explicit figyelembevételével ún. mikroszkopikus leírást is lehetővé tesznek. Az egyrészecske és kollektív szabadsági fokok kölcsönhatása, kombinációja vezetett az egyesített magmodell felállítására. Egy újabb, a héjmodell egyszerűsítéséből nyert közelítés, a kölcsönható bozon, majd bozon-fermion modellek (IBM és IBFM) megjelenésével újabb fejlődés vette kezdetét, mely napjainkra a magszerkezeti kutatásokban átütő eredményeket hozott. Ezek a modellek, míg a korábbiaknál jobb fenomenologikus leírást eredményeznek, a mikroszkopikus megközelítést is közvetlenebbül alapozzák meg, és ma már nem hiányozhatnak a kutatás fegyvertárából.

A szerző a motivációban a posztgraduális képzés, a doktoranduszok, kísérleti magfizikusok igényeit jelöli meg, de a könyv valójában az élvonalbeli kutatónak is nagyon hasznos. A bevezető fejezetben a magfizika 1911-es születésétől (Rutherford atommodellje) követi nyomon a történet főbb állomásait. A második fejezetben az atommagok alapadatait és -tulajdonságait, a magerőket, a kölcsönhatásokat, a deuteron elméletét tekinti át. Ezután a statisztikus (Fermi-gáz) modellt írja le. A héjmodellek legegyszerűbb változata, a független részecske-modell (zárt héjak, elektromágneses átmeneti valószínűségek, momentumok) tárgyalása után a kétnukleon-konfigurációkkal, perturbációelmélettel, kevert konfigurációkkal, mátrixelemekkel, majd a sokrészecske-konfigurációkkal, párkorrelációkkal, kvázirészecske-

számításokkal, clustermodellekkel foglalkozik. Ezután a gömbszimmetrikus magtörzs vibrációinak részecske-lyuk gerjesztéseket alapul vevő, különféle közelítésekkel történő mikroszkopikus leírását mutatja be. Mindezek a leírások a nukleonok centrális gömbi átlagtérben végzett mozgásából indulnak ki. Végül a deformált magok héjmodellje (Nilsson-modell) következik.

A magot folyadékcseppnek tekintő geometriai kollektív modellek keretében a gömbszimmetrikus magok kisenergiájú felületi rezgését, továbbá deformált magok felületi vibrációját, majd a rotációját tárgyalja. Ide illeszti be az egyesített magmodellt, a kollektív mozgásokat (felületi vibrációt és deformált mag esetén rotációt is) végző magtörzs és az egyedi pályán lévő valencia-nukleon képével. A térfogati kollektív gerjesztéseknek (óriásrezonanciáknak) klasszikus hidrodinamikai, valamint részecske-lyuk gerjesztések szuperpozícióján alapuló mikroszkopikus megközelítése is lehetséges. A rotációról szóló fejezetben többek között a rotációs állapotok mikroszkopikus leírása (cranking modell), a nehézion reakciókban gerjesztődő nagyspinű állapotok, a szuperdeformált magok témája kap helyet. Az utolsó két fejezetben a magszerkezet-vizsgálatokba nukleonpárokkal bozon változókat és modern algebrai módszereket bevezető, az utóbbi két-három évtizedben óriási fejlődést felmutató kölcsönható bozon modellek (IBM) különféle változatainak és azok kiterjesztéseinek összefoglaló tárgyalása található. E modellekkel főleg kollektív tulajdonságok írhatók le, de a végső mikroszkopikus megalapozás a héjmodellből ered. Az ezirányú vizsgálatok a magkutatás egyik legérdekesebb és legaktívabban művelt területét jelentik.

Nem lezárt témák is helyet kapnak, pl. a kvantumkáosz, a nagyspinű állapotok, a kölcsönható bozon-fermion (IBFM) modellek. A betöltési szám reprezentáció, az impulzusmomentum algebrája, a szimmetriák modern algebrai leírása (csoportelmélet, Lie-csoportok) függelékként zárja a könyvet.

A fenti módszerekkel, melyek bemutatását itt csak vázlatosann kísérelhettük meg, nagy mennyiségű kísérleti anyag osztályozható és értelmezhető. A szerző az elméleti eredményeket minden esetben összehasonlítja a kísérleti adatokkal. A szigorú matematikai levezetéseket többnyire kerüli, de megadja az irodalmi hivatkozást, ahol a részletek megtalálhatók. Illusztrációképpen numerikus számításokat is bemutat konkrét magokra. Az óriásrezonanciák tárgyalása szokatlanul rövid, talán mert ezek a mag egész térfogatára kiterjedő kollektív gerjesztések igazában már nagyenergiájú (>10 MeV) állapotok, nem esnek az egyedi nívók tartományába. Azonban ehhez is kimerítő hivatkozást ad.

A könyv kiadása tényleg időszerű volt, miután az utolsó nagy összefoglaló munkák nyolc–tizenkét éve jelentek meg. A mű ezért hézagpótló a legfrissebb, aktuális témák monografikus feldolgozásában. Ilyen például a neutronok és protonok egymással szemben történő kisszögű oszcillációja (scissor mode), vagy a különféle dinamikus szimmetriák egységes algebrai leírása az IBM modellek keretében. Csak örülhetünk, hogy érdemes hazai magfizikusaink eredményei is gazdagon képviselve vannak.

A könyv kiállítása gondos, igényes; az ekkora vállalkozásnál óhatatlanul előforduló sajtóhibák száma az angol nyelvűség ellenére sem nagy, jóllehet némelyik név helyesírása megtréfálja a szerzőt (vagy a nyomdát?). Így például a Cockcroft név helyesen három „c”-vel írandó (tehát nem Cockroft, mint a legtöbb magyar szerzői hivatkozásban). Vagy például szöveg közben Ragnasson és Bosterli (az irodalomjegyzékben már helyesen Ragnarsson és Bolsterli) olvasható. Majorana neve is előfordul két n-es alakban. A hivatkozott irodalom nem mindenhol a legfrissebb (például a szeparációs energiák Audi-Wapstra-féle 1993-as kiadásánál van már újabb is).

E kitűnő könyv kiadása mindenképpen nagy nyeresége a magfizikának. Mint általános kézikönyv, a felhalmozódott irodalmi anyagot kompakt formába öntve megkönnyíti a tájékozódást, ugyanakkor a nemzetközi rangú szép hazai eredményeket is felmutatja, megmentve őket a lassú elsüllyedéstől az irodalom áradatában. *(Tibor Fényes: Structure of Atomic Nuclei. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002)*

Lakosi László
a fiz. tud. doktora, tudományos tanácsadó

„Újból élõ és makacs halott”
Fábry Zoltán összegyűjtött írásainak utolsó kötete

A sorozat szerkesztője, ***Fónod Zoltán*** e tizenkettedik kötet ***Számadás***ában ezzel kezdi mondandóját: „Utolsó kötetéhez érkezett az 1980-ban elindított Fábry Zoltán-életműsorozat. A megjelent kötetekben az életmű egészét mutattuk be. Kihagyásokat csak elvétve alkalmaztunk…” Mi még hozzátesszük: e kötet – a sorozaton belül – kivételes helyet foglal el. Tematikája és a kötet szerkesztése is erre hívja fel a figyelmet. Ugyanis: a főszövegben az 1969-1970-es írások kapnak helyet (például a ***Végrendelet***, a ***Nincs elveszett poszt*** – 1970-ből), a Függelékben ***A vádlott megszólal***; s ehhez csatlakozik az 1945-1948-ból datált ***Üresjárat*** (a Noteszek feljegyzései). Mindezt úgy megoldva (szerkezetileg), hogy a 69-70-es írások, valamint ***A vádlott megszólal***, s a ***Végrendelet*** mintegy „körülöleli” az ***Üresjárat*** noteszeivel együtt a harminchárom írást, melyek a korábbi kötetekből kimaradtak (az 1930-as évekből), s amelyek „a Fábry-életmű szempontjából” és az író „antifasizmusa szempontjából fontosak”, hiszen ***erõteljesen*** fejezik ki Fábry ilyen irányú törekvéseit.

Persze: a „botránykő” ***A vádlott megszólal***; emiatt késett ez írás elhelyezése az életmű-sorozatban. Igaz, az időrendi közlést felborította, de most, ilyen szerkezeti megoldással talán jobban belesimul az életmű egészébe. Hiszen ***A vádlott megszólal*** nem egyenlő az egész Fábry-életművel, mint egy időben értelmezték. Megfordítva igaz: része ennek az életműnek; Fábry Zoltán ebben az írásában (egy) bizonyos, tragikusnak mondható történelmi mozzanatot rögzített. De olvassuk csak úgy, hogy előttünk van Fábry ***Végrendelet***e, az utolsó írás, a ***Nincs elveszett poszt***, az ***Üresjárat*** notesz-feljegyzései: ***A vádlott megszólal*** a „helyére” kerül. Érthető módon: a történelem (és a politika) szorításában óhatatlanul valamiféle legenda vette körül, éppúgy, mint az ***Üresjárat*** feljegyzéseit. Most, egy teljesebb szövegkörnyezetben kilépett a nyilvánosság elé.

Azt lehet mondani, ebben az egyetlen kötetben – mintegy összesűrítve – olvasható Fábry Zoltán gondolatrendszerének egésze. Ugyanis: amíg lehetett, Fábry nyíltan és írásban elmondotta azt, amit vészterhes és embert fenyegető időkben, gondolatait rejtetten csak magányának jegyezhetett fel. Másmás tematikai megközelítésben, eltérő célkitűzéssel ugyanarról beszél: a háború ellen, mindenfajta, embert tipró zsarnokság ellen, a humanizmusért, az emberért emel szót. A ***Nincs elveszett poszt*** kisebbségi problematikája éppúgy súlyosan nehezedett lelkére és gondolataira, miként az 1937-es ***Fegyver s vitéz ellen*** megszívlelendő írói hagyatéka: „vegyétek: ez a mi mondanivalónk. Ennyi a mi értelmünk és örökségünk”. Adyról (ki tudja, hányadszor) szólva megdöbbentő a felismerés: „A nagyok, a zsenik sorsa: búvópataksors. El-eltűnnek és újra jelen vannak, és mindig hömpölygőbben, növekvőbben”. Miként az „újból élő és makacs halott”.

Bizonyos kényszerhelyzetből adódóan a szerkesztés így köti össze a múltat a többszörösen leszorított félmúlttal, emezt pedig – a felszínre emelve – jelenünkkel. Olyan

ez, mint a palackposta. Hiszen Fábry életében és sorsában, a stószi házba leszorított, *lezárt gondolatok*, a notesz-írások egyes történelmi fordulópontokon mindennaposak voltak. Ezek az írások gyakran törmeléknek látszanak, ám belőlük *is* összeállítható gondolatrendszere. Abban bízott, makacsul: egyszer ezek az írások, gondolattöredékek – ha már ő nem is létezik – napvilágra kerülnek. Ma ezeket az írásokat együtt, valóságként, hagyatékként vehetjük kezünkbe.

Öt hónappal halála előtt öntötte végleges formába végrendeletét. „Az író legigazibb öröksége a mű: könyveinek, írásainak összessége, hatása, továbbélése…" „Végrendeletemmel nem akartam sem többet, sem kevesebbet, mint szlovákiai magyar lényegünknek, a *vox humanának* látható emléket és továbbható folyamatosságot biztosítani…"

Fónod Zoltán pedig máris előretekint; tudniillik arra gondol, hogy „… a korábban megindított Csehszlovákiai Magyar Írók sorozatban egy tartalmas válogatásban helyet kapjanak a legértékesebb és időtálló Fábry-művek, melyek a jövő számára is megszívlelendő üzenetet hordoznak…" *(Fábry Zoltán összegyûjtött írásai. 12. kötet. „Újból élõ és makacs halott". Válogatta és összeállította Fónod Zoltán. Madách, Posonium, 2001, 560 p.)*

Kovács Gyõzõ
az irodalomtudomány kandidátusa

Vízügyi történelem

A legutóbbi évtizedben történelmi múltunk sok ismeretterjesztő műve látott napvilágot. Talán a legismertebb volt ezek közt a Glatz Ferenc nevével jelzett Magyarok Krónikája. Bizonyos, hogy a gazdag illusztrációs anyaggal, kronológiai adatsorral kísért, általános tájékoztatást nyújtó összefoglalók az adott témában járatlan olvasót egyszerre részesítik a lexikon, a monográfia és az enciklopédia előnyeiben, de eddig ezeknek a népszerűen megírt magas színvonalú munkáknak mindegyike nélkülözte hazai vizeink, azok hasznosításának, kártevéseinek történeti eseményeit, értékelését.

A *Vizeink Krónikája* népes szerzőgárdája nagy vállalkozásba fogott a színes képekkel bőségesen illusztrált kötet megírásával. Jóllehet, a könyv a hazai illetve a Kárpát-medencei vizek története, tudnunk kell, hogy nemcsak a vizeknek, hanem a népeknek és nemzeteknek is krónikája. A könyv az emberekről, társadalmakról szól, arról, hogy milyen történeti kapcsolatot alakított ki a Kárpát-medencében élő ember a sorsát mindenkor döntően meghatározó elemmel, a vízzel. Miként élt a folyók és állóvizek mentén, hogyan használta őket, miként élt a természet adta lehetőségekkel, hogyan próbálta a vizek károkozásait csökkenteni. Hiszen a magyarság sorsát nemcsak csaták, háborúk, szabadságküzdelmek, napi politikai fordulatok alakították, hanem a mindennapi megélhetéshez vezető gazdálkodás és a folyamatos munka. A könyv közel háromezer kronológiai adata, kétszázötven magyarázó cikke az emberi alkotások történetére helyezi a hangsúlyt.

A könyv cikkeinek jelentékeny része új kutatási eredményeket tartalmaz. Ezekből látható: tévhitnek bizonyult például, hogy a Balaton vízállásának szabályozására Galerius római császár idején építettek volna Siófoknál zsilipet. Egyes környezetvédők szerint a régi ártéri gazdálkodás a vizek mentén élők számára lágy harmóniát jelentett a természettel. A történeti források alapján a valóság az, hogy a „fokok" segítségével űzött gazdálkodás csak a túléléshez lehetett elegendő. A népesség növekedése a 19. században már kikényszerítette a vízszabályozásokkal segített szántóföldi gazdálkodást. A legújabb idők leírása szót ejt az elhárított ár- és belvízveszedelmekről, a „közműollóról", a bányászat dunántúli karsztvizekre gyakorolt hatásairól,

a Velencei-tó 1993-95 közötti vízpótlásáról. Részletes összefoglaló tartalmazza az 1989. évi rendszerváltás „trójai falovaként" aposztrofált Bős-Nagymaros dunai vízlépcsőrendszer kérdéseit. A jelent és a várható közeli jövőt az európai uniós csatlakozás vízügyi keretirányelvei és a Vásárhelyi-terv Tisza árvízkárait korlátozni hivatott kiegészítésének irányelvei mutatják be.

A könyv a *Vízügyi Múzeum, Levéltár és Könyvgyûjtemény* kiadásában, számos vízügyi szervezet és vállalkozás támogatásával jelent meg. *(Fejér László (szerk.) Vizeink krónikája. Vízügyi Múzeum, Levéltár és Könyvgyûjtemény, Budapest, 2001. 306 p.)*

E terület másik érdekes kiadványa a 18-20. sz. neves vízmérnökeinek életét és munkásságát mutatja be. A vízügyi történelem bővelkedett olyan emberekben, akik nagyszerű szakemberek, kiemelkedő erkölcsiségű emberek és áldozatkész hazafiak voltak. Ebben a könyvben e nagyszerű emberek életútjáról, emberi és mérnöki nagyságáról olvashatunk, tanulva a múltból, erőt merítve a jövőre. A szerző a könyv több helyén is rámutatott, hogy a nagy tetteket végrehajtó egykori vízmérnökeinkről gyakran elfelejtkezett az utókor. Az emlékezés felelevenítésére, a vízügyi szakterület mai munkálóinak és most kezdő fiataljainak tájékoztatására és lelkesítésére állította össze életrajzi gyűjteményét. A könyv I. kötete jeleseink közül a következő személyiségekről emlékezik meg részletesen:

Kiss József (1748-1813), Vay Miklós (1756-1824), Vedres István(1765-1830), Huszár Mátyás (1778-1843), Bodoky Henter Mihály (1782-1838), Bodoki Henter Károly (1814-1868), Bodoky Lajos (1833-1885), Bodoky Kálmán (1858-1918), Beszédes József (1787-1852), Lányi Sámuel(1791-1860), Vásárhelyi Pál (1795-1846), Keczkés Károly (1798-1856), Hieronymi Ottó Ferenc (1803-1850), Hieronymi Károly (1836-1911), Asbóth Sándor (1811-1868), Reitter Ferenc (1813-1874), Képessy József (1818-1876), Herrich Károly (1818-1888), Zsigmondy Vilmos (1821-1888), Zsigmondy Béla (1848 -1916), Boros Frigyes (1825-1892), Péch József (1829-1902), Kvassay Jenő (1850-1919), Malina Gyula (1853-1918), Zielinszki Szilárd (1860-1924), Bogdánfy Ödön (1863-1944), Sajó Elemér (1875-1934) és Lampl Hugó (1883-1976).

A II. kötetben szereplő személyiségek: Bőhm Ferenc (1736-1799), Balla Antal (1739-1815), Magyar István (1745-1801), Laáb Gáspár (1747-1834), Sexty András (1759-1827), Halász Gáspár (1787-1859), Vörös László (1790-1870), Lechner József (1791-1847), Lechner Lajos (1833-1898), Giba Antal (1797-1846), Varga János (1798-1850), Molnár (Müller) Pál (1815-1904), Katona Antal (1816-1881), Korizmics László (1816-1886), Mihálik János (1818-1892), Mitskei Imre (1820-1899), Hollán Ernő (1824-1900), Mokry Endre (1827-1889), Szojka Gusztáv (1835-1887), Bertalan Lajos (1838-1901), Hajnal Antal (1838-1907), Feketeházy János (1842-1927), Wallandt Ernő (1845-1912), Gerster Béla (1850-1923), Gonda Béla (1851-1933), Benedek Pál (1839-1909), Benedek József (1876-1941), Benedek Pál (1908-1942), Mihailich Győző (1877-1966).

Minden szakterület fejlődésének záloga a múlt eredményeiből való építkezés. A nagy elődök ismerete és megbecsülése a jövő szempontjából fontos. Ez a mai kor feladata és kötelezettsége. A nagy elődök, a nemzet *inzselléreinek* leltározásakor a szerző úgyszólván a bőség zavarával küzdött. Az elöd generációk bővelkednek jeles mérnökökben, akiknek emléket állítani, életútjukat, szakmai munkásságukat és emberi nagyságukat bemutatni szép és hálás feladat volt. *(Ágoston István: A nemzet inzsellérei. Alsó-Tisza vidéki Vízügyi Igazgatóság, Szeged, 200 -2002, I. 126 p., II. 134 p.)*

Vágás István
a műszaki tudományok doktora

CONTENTS

Nanoscience – Nanotechnology

József Gyulai: Introductory Remarks 1076
István Bársony: With Micromachining Techniques towards Nanotechnology 1083
Árpád Csurgay: Circuit Theory in Nanoelectronics 1090
Norbert Kroó: Surface Plasmons and Near-Field Microscopy 1096
Aladár Czitrovszky – András Hámori – Árpád Kiss – Lajos Pogány: High Resolution Laser Interferometric Surface Diagnostics for Nanotechnology... 1099
Árpád Barna – Miklós Menyhárd: Ion Sputtering and Nanotechnology 1106
Zoltán Kónya – János B. Nagy – Imre Kiricsi: Preparation and Application of Carbon Nanotubes 1114
László Péter Biró: Novel Carbon Nanotube Architectures..... 1122
Dezső Beke – Zoltán Erdélyi – István Szabó – Csaba Cserháti – Gábor Langer – Lajos Daróczy: Diffusion on Nanoscale..... 1130
László Guczi: Catalytic Behaviour of Metallic Nanoparticles 1138
Imre Dékány: Nanostructured Materials and the Colloidal State..... 1145
Erika Kálmán – Ágnes Csanády Bodoki : Nanostructured Coatings 1154
György Vámosi – Andrea Bodnár – Miklós Győrffi – László Bene – Sándor Damjanovich: Nanotechnology in Biology..... 1166

Study

Sándor Csörgő – Lajos Rónyai – Imre Ruzsa: What's What? 1174
Glänzel Wolfgang – András Schubert – Tibor Braun: One Less 1180
Sámuel Komoly: State of The Art Diagnosis and Treatment of Neuroimmunological Diseases 1184

Academy Affairs

Science for All 1193
World Science Forum 1195
Hungarian Society of Predictive and Molecular Epidemiology..... 1196
Greeting 1197

Outlook (László Jéki – Júlia Gimes) 1198

Obituary

András Lévai *(Gergely Büki – Gyula Csom)* 1203

Book Review 1205

Ajánlás a szerzõknek

1. A Magyar Tudomány elsősorban a tudományterületek közötti kommunikációt szeretné elősegíteni, ezért elsősorban olyan kéziratokat fogad el közlésre, amelyek a tudomány egészét érintő, vagy az egyes tudományterületek sajátos problémáit érthetően bemutató témákkal foglalkoznak. Közlünk téma-összefoglaló, magas szintű ismeretterjesztő, illetve egy-egy tudományterület újabb eredményeit bemutató tanulmányokat; a társadalmi élet tudományokkal kapcsolatos eseményeiről szóló beszámolókat, tudománypolitikai elemzéseket és szakmai szempontú könyvismertetéseket.

2. A kézirat terjedelme szöveges tanulmányok esetében általában nem haladhatja meg a 30 000 leütést (a szóközökkel együtt, ez kb. 8 oldalnak felel meg a MT füzeteiben), ha a tanulmány ábrákat, táblázatokat, képeket is tartalmaz, a terjedelem 20-30 százalékkal nagyobb lehet. Beszámolók, recenziók esetében a terjedelem ne haladja meg a 7-8 000 leütést. *A teljes kéziratot .rtf formátumban, mágneslemezen és 2 kinyomtatott példányban kell a szerkesztõségbe bekülde*ni.

3. A közlemények címének angol nyelvű fordítását külön oldalon kell csatolni a közleményhez. Itt kérjük a magyar nyelvű kulcsszavakat (maximum 10) is. A tanulmány címe után a szerző(k) nevét és tudományos fokozatát, a munkahely(ek) pontos megnevezését és – ha közölni kívánja – e-mail-címét kell írni. A külön lapon kérjük azt a *levelezési és e-mail címet*, telefonszámot is, ahol a szerkesztők a szerzőt általában elérhetik.

4. Szöveg közbeni kiemelésként *dõlt,* (esetleg **félkövér** – bold) betű alkalmazható; ritkítás, VERZÁL betű és aláhúzás nem. A jegyzeteket lábjegyzetként kell megadni.

5. A rajzok érkezhetnek papíron, lemezen vagy email útján. Kérjük azonban a szerzőket: tartsák szem előtt, hogy a folyóirat fekete-fehér; a vonalas, oszlopos, stb. grafikonoknál tehát ne használjanak színeket. Általában: a grafikonok, ábrák lehetőség szerint minél egyszerűbbek le gyenek, és vegyék figyelembe a megjelenő oldalak méreteit. A lemezen vagy emailben érkező ábrákat és illusztrációkat lehetőleg .tif vagy .bmp formátumban kérjük; értelemszerűen feketefehérben, minimálisan 150 dpi felbontással, és a továbbítás megkönnyítése érdekében a kép nagysága ne haladja meg a végleges (vagy annak szánt) méreteket. A közlemény szövegében tüntessék fel az ábrák kívánatos helyét.

6. Az irodalmi hivatkozásokat mindig a közlemény végén, abc sorrendben adjuk meg, a lábjegyzetekben legfeljebb utalások lehetnek az irodalomjegyzékre. Irodalmi hivatkozások a szövegben: (szerző, megjelenés éve). Ha azonos szerző(k)től ugyanabban az évben több tanulmányra hivatkozik valaki, akkor a közleményeket az évszám után írt a, b, c jelekkel kérjük megkülönböztetni mind a szövegben, mind az irodalomjegyzékben. Kérjük, *fordítsanak különös figyelmet a bibliográfiai adatoknak a szövegben,* illetőleg *az irodalomjegyzékben való egyeztetésére!* Miután a Magyar Tudomány nem szakfolyóirat, a közlemények csak a legfontosabb hivatkozásokat (max. 10-15) tartalmazzák.

7. Az irodalomjegyzéket abc sorrendben kérjük. A tételek formája a következő legyen:

• Folyóiratcikkek esetében:

Alexander, E. O. and Borgia, G. (1976). Group Selection, Altruism and the Levels of Organization of Life. Ann. Rev. Ecol. Syst. **9**, 499-474

• Könyvek esetében:

Benedict, R. (1935). *Patterns of Culture*. Houghton Mifflin, Boston

• Tanulmánygyűjtemények esetén:

von Bertalanffy, L. (1952). Theoretical Models in Biology and Psychology. In: Krech, D., Klein, G. S. (eds) *Theoretical Models and Personality Theory*. 155-170. Duke University Press, Durnham

8. Havi folyóirat lévén a *Magyar Tudomány* kefelevonatot nem küld, de az elfogadás előtt minden szerzőnek elküldi egyeztetésre közleménye szerkesztett példányát. A tördelés során szükséges apró változtatásokat a szerző egy adott napon a szerkesztőségben ellenőrizheti.

MAGYAR

ACADEMIAI ÉRTESÍTŐ.

I. Év. 1840. Nov. Dec. I. Sz.

E' lapok időről időre minden, az academiai gyülésekben előforduló 's közzé tételre alkalmas tárgyakat, valamint az intézetet illető fontosabb hivatalos jelentéseket, közlik. — Kaphatók Eggenberger J. és fia academiai könyvárusoknál 's általok a' két haza' minden hiteles könyvárusainál.

KIS GYÜLÉS, NOV. 16. 1840.

Gr. Teleki József úr Ő Exja' elnöksége alatt

Jelen Schedius tt. — Bajza, Balog, Bugát, Döbrentei, Frivaldszky, Gebhardt, Győry, Kállay, Kiss, Luczenbacher, Szemere, Szilasy, Sztrokay, Vörösmarty rr. tt. — Antal, Balla, Bertha, Bloch, Erdélyi, Gaal, Garay, Horváth M., Mátray, Nagy, Podhradczky, Széchy, Székács, Szigligeti, Taubner, Vajda II. tt. — Schedel Ferencz titoknok, Szalay László segédjegyző.

HORVÁTH MIHÁLY lt. a' szószéken,

az 1514*ki magyar pórhadat* tárgyazó értekezést olvasott, mellyben, előre bocsátván milly fontosak a' népek' történeteiben általánosan a' néposztályi viszonyok, általment czeknek minőségére 's különösen a' democratiának az aristocratia elleni harczára Magyarországban, előterjeszté miképen e' harcz az alsóbb osztályra szerencsétlenül ütvén ki, a' keresztes had' felállítása lt. Ulászló alatt módot nyújtott a' föld' népének a' pórháború' zászlóit felütni, melly a' támadók' leveretésével végződvén, a' nemesség szolgai bilincsekbe szorította az iszonyúan bünhesztett pórságot. Mutogatta továbbá az értekező, miszerint ez által a' pór osztályban minden nemzeti érzet elfojtatott, 's a' nemesség elleni bizodalmatlanság 's ellenséges indulat annyira megrögzött, hogy az anyagi érdekek' gyarapodása is meggátoltatnék, minek kiegyenlítését azonban a' nemzet' fejlettebb értelmisége napjainkban bizton reméltheti.