

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 szilíciumszelét – ilyenkor „hordozó”-nak nevezzük – egyes térfogatrészeit szelektív módon eltávolítják, azaz megmunkálják, „faragják”. Így, a jobbára síkban építkező integrált áramkört (IC) technológiával szemben a mikrogépészetben a hordozót a harmadik dimenzióban is alakítják, valamint további szerkezeti rétegeket alkalmaznak az elektromechanikai működés megvalósítására.

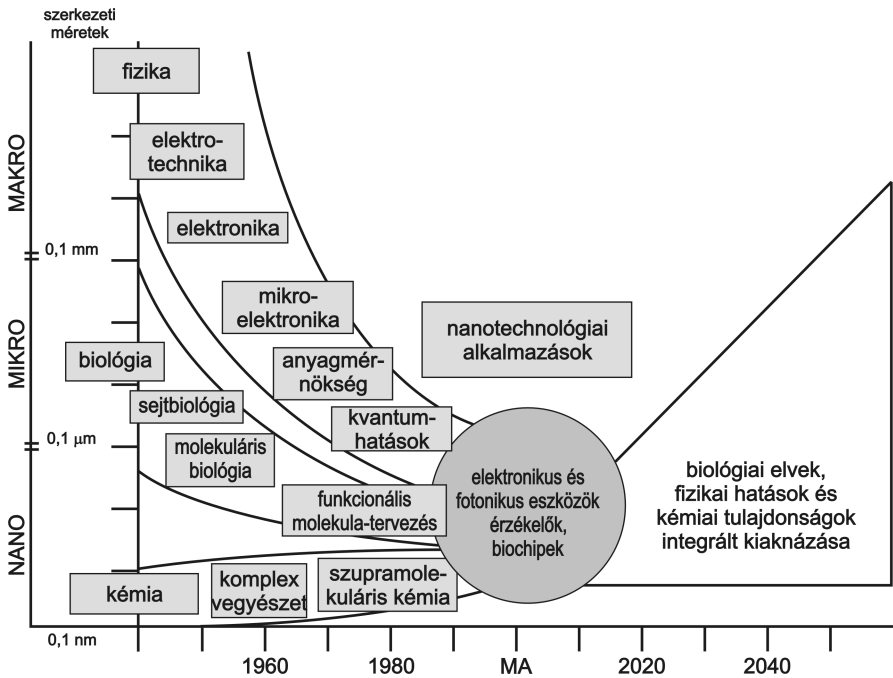
A mikrogépészet és a Si-mikroelektronika együttes lehetőségeinek kiaknázásával a MEMS technológia már ma is meghatározó alaptermékévé vált. Az érzékelés és vezérlés, beavatkozás egyetlen rendszeren belüli megvalósításával, az IC-k számítási képességét ötvözi a mikroérzékelés és -beavatkozás lehetőségeivel. Ebben a felfogásban az integrált áramkörti 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 pász-tázo-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 gyógyszerrek 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 világcpiacának 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 rézkarc-technika rokonságához tartozó, ún. fotolitográfias, síkbeli ábrakialakítást alkalmazó Si-alapú integrált áramköri technológiákkal. A technológia komplexitásának növekedésével azonban egyre nagyobb számban jelennek 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 avilágon ma technológiailag legkiforrottabbnak tekinthető szilícium technológiához.* A MEMS sokkal inkább tekinthető *gyártási filozófiának* a komplex elektromechanikai rendszereknek az IC-gyártáshoz 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 termelékenységét



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-ekkel 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 légszákjainak gyártásában.

A MEMS-technológia tehát mára a termékszintű gyártás eszközeivé 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), *merőben új ered-*

mények (értsd „genetika-analóg”) érhetőek 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 előállítására, 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, valamint 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, rendszer szinten kell kezelni.

A termékek miniaturizálásának 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 önszerveződés, a masszív párhuzamos rendszerek belépésével a bottom-up szintézis a „tradicionális” top-down technológiával, azaz destruktív módszerekkel gyártott eszközökben teremt lehetőséget 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-nanoszintű fizikai mérés technika, a hossz, tömeg és erőmérés 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, mikroszerzőszám-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 *molekulaszintű 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-folyadék-adagoló (microfluidics) chippel célszerű megoldani. Az egyidejű processzálas igénye azonban megköveteli több párhuzamosan vezérelt lézercsipesz alkalmazását. Ezt a megsokszorozott működést egyetlen lézerrészforrás felhasználásával, MEMS mikrotükhálózatokkal elért nyalábosztással, már demonstrálták [3]. A MEMS alapú optikai nyalábvezérlés egyébként a nanorészecske-manipuláció 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.

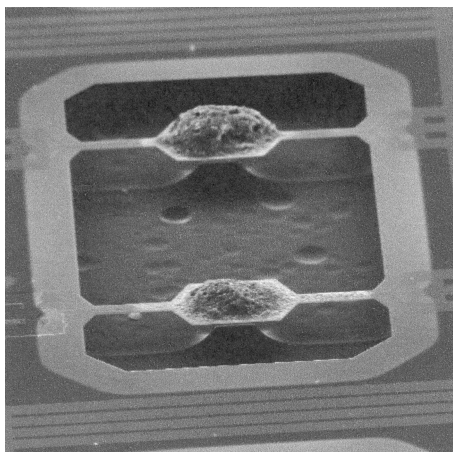
Pásztázó-szondás eljárásokkal való *atomi skálájú építkezésnél* elengedhetetlen lesz a felhasznált AFM csúcs egzakt minősítése. A nanomanipulációs szerszám (egyébként szintén MEMS-termék) geometriája pontos meghatározásának egyetlen ismert módja a tér-emissziós ionmikroszkópiával (FIM) megvalósított leképezés. A pontos pozicionálást a pásztázás során az atomok leszámolásával 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 gázérzékelő* 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 nanoméreték 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 *nanokatalízis* 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 nanoméreték



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

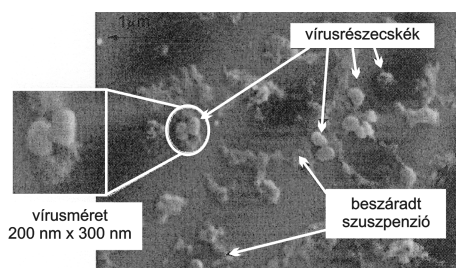
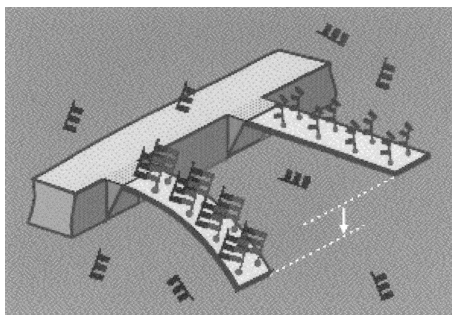
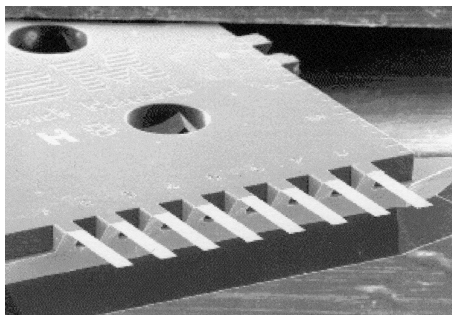
hordozta funkcionalitás hasznosításáról van szó MEMS-eszközökben [5].

A *bio-molekuláris mikrorendszerekkel* megvalósítható *molekulaszintű érzékelés* szintén intenzíven kutatott területe a nanoméretekkal is dolgozó MEMS-technológiának. A biomolekuláris mikrorendszerek három integráns eleme: *a molekulaszintű 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 jutott oldatból a hibridizáció során a felismert molekulák kötődnek, míg a referencia-elektrodára 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-folyadék-mennyiségek 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 állít-



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].

hatók elő, melyekre nem csak orvosdiagnosztikai és gyógyászati, hanem biztonsági és védelmi területen is óriási az igény.

A nanotechnológia szerepe azonban nem csak miniaturizált eszközökben válik döntővé. A megújuló energiaforrások között emiatt szerepet töltenek be a *nagyfelületű 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 eszközzeit ún. *nanokompozit műanyagok* 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 költségsökkentést is elérhetővé teszi.

Hol van a hazai tudományos kutatásnak terepe ebben a szédületes tempójú fejlődésben? 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 átívelő, szoros együttműködés, koordinált kutatási integráció nélkül.*

Ha ezt megértjük, és néhány szűk, de az adott vonatkozásban fontos részterületen sikerül magasszintű tudományos teljesítményt felmutatnunk, integrálódunk 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) sikerreivel 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 gázérzékelő, építkező – 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)

