

Integrált (nano)érzékelés az analitika szolgálatában

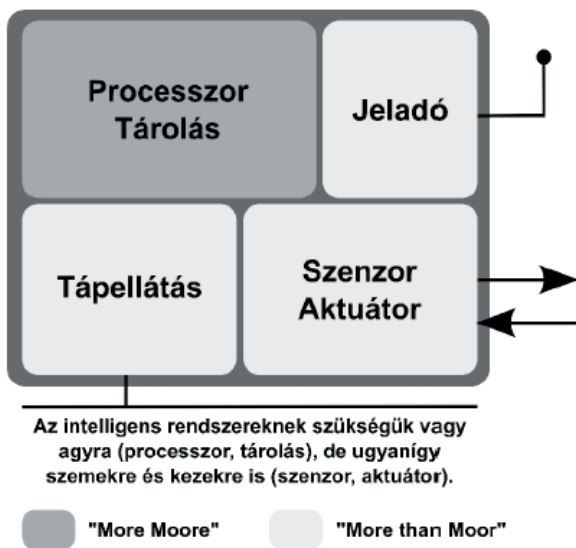
DEÁK András,^a FÜRJES Péter,^a BATTISTIG Gábor^a és BÁRSONY István^{a,b,*}

^aMTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, Konkoly Thege Miklós u. 29-33., H-1121, Budapest

^bPannon Egyetem, Nanotechnológia Tanszék, Egyetem u. 10., H-8200, Veszprém

1. Bevezetés

Az integrált elektronikai eszközök alapvetően változtatták meg a mindennapokat. Itt nem csak a különböző elektronikai megoldásokat felhasználó fogyasztási cikkek, híradástechnikai, szórakoztató elektronikai termékekre kell gondolni, de az ipar területén is forradalmian nagy hatékonyságot és termelékenységet eredményeztek és a tudomány eszköztárát is bővítették. Az integrált (mikroelektronikai) eszközök széleskörű elterjedésüket elsősorban a mikrotechnológia csaknem ötven éves folyamatos fejlődésének köszönhetik, amely a Moore-törvény termelékenység-előrejelzését követi több évtizede. Lehetővé vált ugyanis, hogy korunk legkifinomultabb tisztaszobai technológiájával komplex áramköri elemeket nagy átmérőjű (200-300mm) szilícium egykristály-szeleteken miniatűr (szubmikronos) méretekkel, szabványosított folyamatok alapján állítsunk elő és mindezt a csoportos szelet-megmunkálás révén példátlan termelékenységgel reprodukáljuk.



1. Ábra. A More Moore irányzat szellemében a digitális (processzor és memóriaáramkör) IC-kben folyó arányos méretcsökkentést meghaladó, ún. "More than Moore" jellegű rendszerintegráció alkotóelemei, melyekből valamennyi szabályzott rendszer felépül.

Napjainkban egyre világosabban rajzolódni kezd az újabb trendek, amelyek még összetettebb, a monolit digitális áramköri rendszereken túlmutató heterogén integrációs fejlesztéseket célozzák. Az ilyen analóg/digitális rendszereknek szerves komponenseit alkotják a tápellátást, az érzékelést, a beavatkozást és a huzalozásmentes kommunikációs funkciókat megvalósító integrált eszközök is.

Ez az ún. More than Moore irányzat, amely az intelligens rendszerek adatfeldolgozó- és tároló képességét megfelelő érzékszervekkel és végtagokkal egészíti ki. (1. Ábra).

2. Integrálási lehetőségek az analitikai feladatok megoldásában

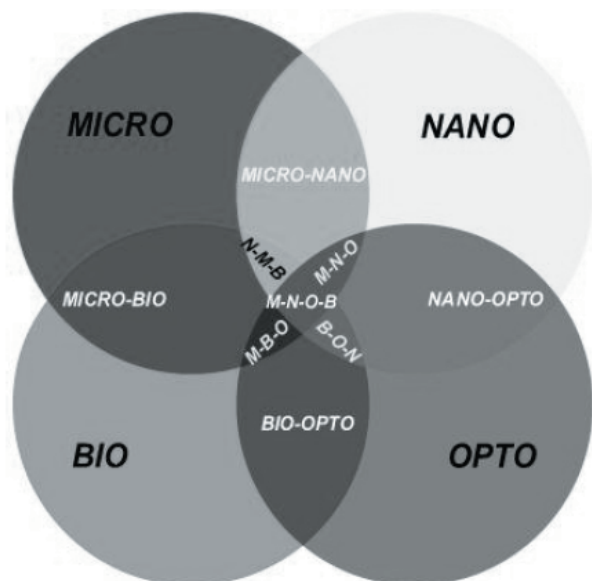
Az integrált analitikai fejlesztések koránt sem jelentik a korszerű, fejlett analitikai módszerek és eljárások konkurenciáját. Deklarált céljuk viszont, hogy az ilyen kisméretű, jobbára kézbe vehető eszközökkel az analitikai pontosságú nagyműszeres vizsgálatokat megelőzően könnyen lehessen akár helyszíni szűrővizsgálatokat végezni, vagy terepen telepíthető, mobil monitorozó egységeket létrehozni. Ezáltal nagyban növelhető a mérhető, monitorozható paraméterek, vagy komponensek száma, ami különösen környezeti, illetve orvos-biológiai alkalmazásokban fontos előny. Ha egy adott komponens bizonyos határértékű kimutatása a feladat szűrővizsgálat jellegű mérésekkel, a parányi méreteknek és a gyártási technológia nagy termelékenységének köszönhetően az ilyen integrált eszköz költségvetéses megoldás lehet. A jellemző minták általában valamilyen fluidban alacsony koncentrációban jelenlévő szerves, vagy szervesetlen komponensek. Az integrált eszközök használata esetén is rendkívül fontos a megfelelő minta-előkészítés, ezt „kis mértékben” megvalósítani nem, vagy csak körülményesen lehetséges. Az analizálandó minták elválasztására, illetve detektálására azonban számos mikrotechnológiai megoldás létezik.

Fontos kiemelni, hogy az integráció szerves következményeként az integrált rendszerekben a különböző diszciplínák jól tervezett összhangjára van szükség. Ez biztosíthatja ugyanis, hogy az eszköz szerkezetében és funkcionalitásában is teljesítse a vele szemben támasztott követelményeket.

Az integrált érzékelést célzó kutatások általában a mikro- és nanotechnológia, valamint a biológia és az elektrooptika határmezsgyéjén mozognak. Ezek a határterületi kutatások jelentik a legösszetettebb feladatot, de egyben a legizgalmasabb kihívást is a kutatók számára. (2. Ábra).

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében művelt nano-kutatási irányzatok is deklaráltnan multidiszciplináris, a fizika, kémia, biológia, a mérnöki tudományok és informatika eredményeinek együttes integrált alkalmazásán alapuló kutatási törekvések.

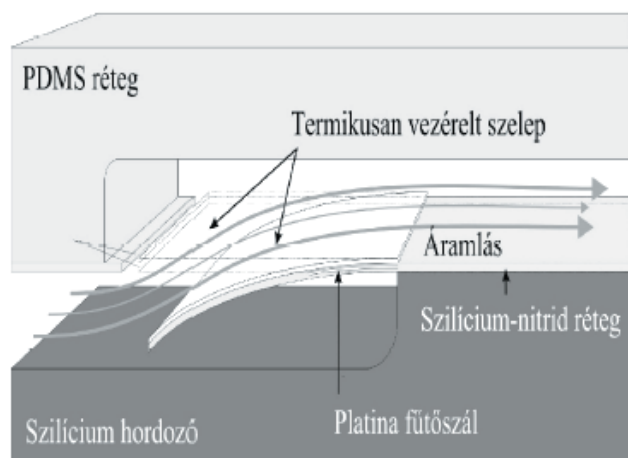
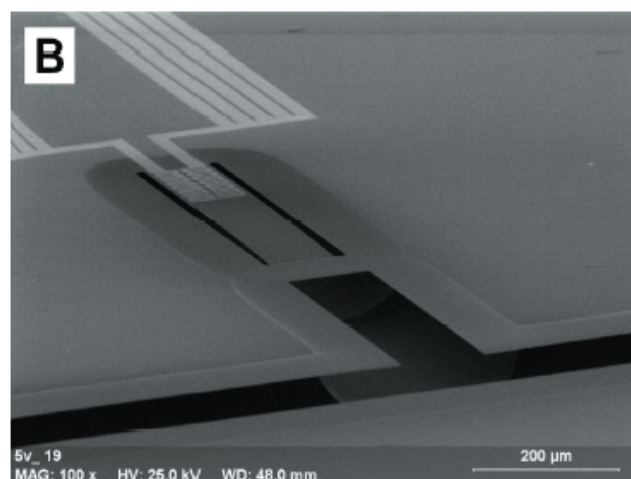
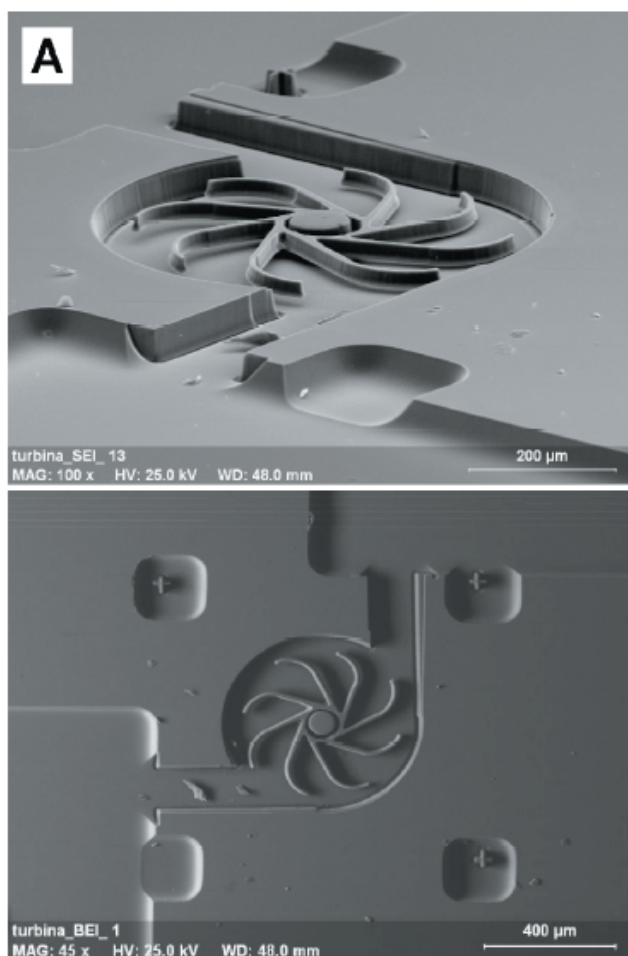
*Főszerző. Tel.: +36 1 392 2225; fax: +36 1 392 2226; e-mail: barsony@mfa.kfki



2. Ábra. A korszerű integrált analitikai megoldások eminens példái a határterületi kutatások lehetőségeinek összehangolt alkalmazására.

2.1. Mikrofluidika

Az analitikai rendszerek forradalmát jelentheti a mikroméreteken történő mintakezelés és elemzés megoldása. A méretek csökkenésével párhuzamos reakciókinetikai paraméterváltozások a mintaanalízis idejének rövidülését, az analitikai eszközök egyszerűsödését hozhatják magukkal, nem utolsósorban pedig a mintaméret csökkentése nagyfokú költségmegtakarítást is jelenthet. A mikrofluidikai rendszereket a mikrométeres karakterisztikus méretekkel rendelkező csatornák, illetve aktív elemek, mint szelepek, pumpák, stb. alkotják (3. ábra).¹ A mintakezelés egyes lépései – hígítás, keverés, szeparáció – különleges struktúrák kialakítását teszik szükségessé, tekintettel a mikroszkópikus tartományokban lejátszódó folyamatok makroszkópikustól való eltérésére. A fluidum továbbítására a mikrotechnológiával kialakított csatornarendszerekben a hagyományos, nyomáskülönbségen alapuló koncepciók mellett kis méretekben hatékonyan működtethetők pl. az elektrooszmózis, vagy elektronedvesedésen alapuló technikák is. Az utóbbi megoldások jelentősége azért nagy, mert a kis áramlási keresztmetszet miatt a mikrofluidikai csatornában rendkívül nagy hidrodinamikai ellenállással kell számolni.



3. Ábra. A) Szilícium egykristályból kialakított mikroturbína, a forgó lapátkerék átmérője <math><400\mu\text{m}</math>. A szerkezet az MTA MFA és az MTA ATOMKI protonnyaláb-litográfias tömbi mikrogépészeti eljárásával készült. B) PDMS fedőréteggel kombinált, Pt-fűtőszál segítségével termikusan aktivált szelep a mikrocsatorna átfolyási keresztmetszetének vezérlésére.

A nanofluidikai rendszereknek tekinthetjük a néhányszor 10nm-es méretjellemzővel rendelkező szerkezeteket, mint hengeres csatornákat, üregeket, vagy akár membránon áthaladó pórushálózatot is. Ezen szerkezetek kialakítása már túlmutat a konvencionális microtechnológiában alkalmazott eljárásokon, megmunkáló eszközként elkerülhetetlen a költséges de perspektivikus nanofabrikációs eszköztár felhasználása - elektronsugaras-litográfia, fókuszált ionnyalábbal történő marás (FIB), protonosugaras írás (PBW) vagy nanoimprinting.²

2.2. Integrált detektorok

A mikroérzékelés a mikro/nanotechnológia talán legígéretesebb alkalmazási területe, ahol a nanofunkcionalitás megszámlálhatatlan új érzékelési lehetőséget kínál. Az integrálható detektorok tekintetében számtalan kialakítás lehetséges. A már rendelkezésre álló és jobbára hazai kutatólaboratóriumokban is fejlesztett érzékelők és módszerek egy – korántsem teljes - felsorolását alábbiakban mutatjuk be (1. Táblázat).

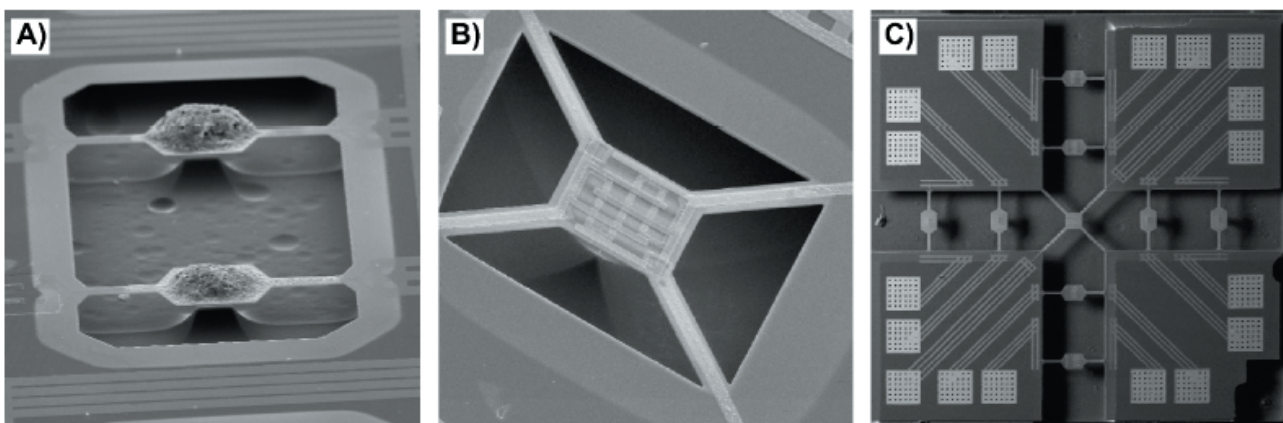
1. Táblázat. Integrált eszközökben alkalmazható detektor típusok.

Kalorimetrikus	Optikai	Mikrogravimetriai	Elektrokémiai
Termisztor	Fluoreszcencia	Kvarc mikromérleg	Amperometria/coulometria
Termopile	Kemilumineszcencia	Felületi akusztikus hullámok	Potenciometria
Pelliszor	Reflektometria	Kantilever	Impedancia mérés
	Felületi plazmon rezonancia		
	Optikai hullámvezetés		

A különféle detektálási módszerek diszkrét eszközként ill. a mikrofluidikai rendszerekbe integráltan, heterogén integrációval kialakított komplex analitikai rendszerek alkotórészeként is fontos szerepet játszanak. Különösen fontos, hogy a költséghatékony megoldások alkalmazásával olcsó, egyszer használatos diagnosztikai eszközök kifejlesztése válik lehetővé, ami a nagy-volumenű szűrővizsgálatok elengedhetetlen feltétele. Hangsúlyozandó, hogy ezek a vizsgálatok elsősorban az indikációt szolgálják, küszöbértékek kimutatására alkalmasak.

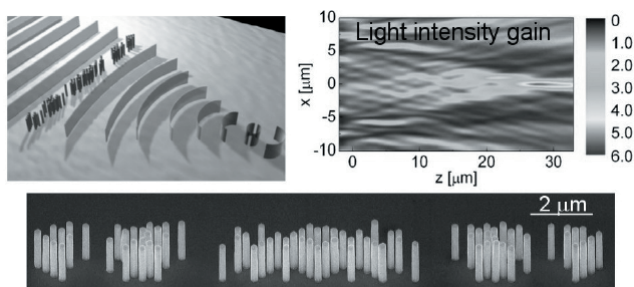
A MEMS technológia lehetőségeinek kihasználásával nagyarányú méretcsökkentés célozható meg az érzékelő eszközök számos területén. A kalorimetrikus – jórészt magas hőmérsékletű – alkalmazások esetén egyértelmű igény merül fel a gazdaságos, biztonságos működésre, amit a minimális teljesítményfelvétel biztosíthat. A követelmény

elegáns megoldását nyújtja a szilárdtest érzékelőkben³ a jelentős méretcsökkentés és átgondolt termo-mechanikai tervezés. Kiváló példái a tendencia érvényesülésének az MFA-ban fejlesztett mikro-fűtőtestek, amelyek kis teljesítményfelvétel mellett képesek biztosítani a magas hőmérséklet elérését, lehetővé téve alkalmazásukat éghető gázok *robbanásbiztos* detektálása, vagy kalorimetrikus áramlásmérés során is (4. ábra).^{4,5} A mikroméretű, extrém körülmények között is működőképes eszközök előállítására körültekintő anyagszerkezeti, technológiai tervezést igényel. Az alapvető microtechnológiai eszköztár (rétegnövesztés, fotolitográfia, kémiai megmunkálás) a komplex szerkezetek háromdimenziós megmunkálását is lehetővé tevő lépésekkel egészül ki (pl. pórusos szilícium segédreteg alkalmazása). Esetünkben ez a háromdimenziós építkezés biztosítja a bonyolult rétegszerkezettel rendelkező, mikroszkopikus méretű eszközökben a felfüggesztett elemek megbízható alkalmazását.



4. Ábra. Az MFA tömbi szilícium mikrogépészeti eljárásával kialakított, termikusan szigetelt, felfüggesztett mikro-fűtőtestek. A baloldali (A) ábrán egy integrált mikropelliszor elem látható a nanoméretű katalizátor szemcséket tartalmazó felső és a referenciaként működő alsó fűtőtesttel éghető gázok detektálására. Középen (B) egy Taguchi-típusú fénoxid gázérzékelő platform, jobboldalt (C) pedig a felfüggesztett fűtőtestekkel felépített, irányfüggő gázáram-mérésre alkalmas áramlásmérő chip felvétele látható. A fűtőelemek felülete valamennyi képen 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$.

Az optikai elven működő szenzorok esetén rendkívül fontos, hogy kis térfogatelemekben lehessen nagy érzékenységgel detektálni. Ez alapvető fizikai jelenségeken nyugvó koncepciókkal is megvalósítható, mint pl. a felületi plazmonok gerjesztése, vagy a hullámvezetés.⁶⁻⁸ A megfelelő nanoszerkezettel bíró, illetve megfelelően érzékenyített (funkcionalizált) szenzor felületekkel ezen technikák teljesítőképessége tovább növelhető. Ilyen megoldás lehet például egy megfelelő nanostrukturált fém szerkezet, melyben plazmoncsatolás, illetve ún. „hot-spotok” jönnek létre, de szintén komoly érzékenységet lehet elérni megfelelő bioreceptorok alkalmazásával. Hagyományos optikai funkciók integrált megvalósítására nanoméretben látható egy példa az 5. ábrán. A ZnO nanorudakból álló oszloprendszer felületközeli lencseként működik, képes egy beérkező síkhullámot néhány μm^3 -es térrészbe koncentrálni.⁹ Az integrált optikai kiolvasású eszközökben használt foto-detektorok esetében a félvezető eszközök méretcsökkentésével előállított hagyományos szenzorok mellett megjelentek a szerves alapú detektorok is. Mivel ezek jobbára vákuumtechnika alkalmazása nélkül, egyszerű nyomdatechnikai eljárással is felvihetőek, a lab-on-a-chip típusú eszközökbe is költséghatékonyan integrálhatóak.



5. Ábra. Hidrotermálisan növesztett ZnO nano-oszlop lencse.⁹

3. Perspektíva

Jelenleg is számos kutató-, és cégcsoport dolgozik azon, hogy az analitikához szükséges különféle funkciókat minél tökéletesebben lehessen integrálni. Már megjelentek a

Integrated (nano)sensing for analytical purposes

This article gives a short overview about the challenges and possibilities in the field of integrated sensing. Several examples from our own activity in the field of micro- and nanotechnology are shown, that are related with the topic of integrated analytics. The

piacra az első eldobható mikrofluidikai chippek, melyek segítségével gyors (elsősorban biológiai) tesztek végezhetőek. A szerves alapú elektronikai és optoelektronikai termékek fejlesztésével elérhető közelségbe kerültek a nyomtatott fényforrások, illetve foto- és elektrokémiai detektorok. Ezek segítségével akár hagyományos nyomdatechnikai eljárásokkal is megvalósíthatóak összetett integrált eszközök. A mikrotechnológia eszköztárát kiegészítve új típusú mintázási eljárásokkal (pl. szoft-litográfia, nanoimprint-litográfia), az eszközök alapjául szolgáló és felhasználható anyagfajták köre folyamatosan bővül. Ez előre vetíti az integrált érzékelő eszközök rohamos elterjedését nem csak a tudomány, de a mindennapi élet számos területén is.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az OTKA F61583, OTKA PD77578 és NF69262 pályázatok anyagi támogatásáért.

Hivatkozások

1. Rajta, I.; Szilasi, Sz.; Fürjes, P.; Fekete, Z.; Dücső, Cs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **2009**, *267*, 2292-2295.
2. Gyurcsányi, R. E.; Höfler, L.; Cserkaszky, Á.; Varga, T.; Lautner, G.; Jágerszki, Gy.; Fürjes, P.; Tóth, A. L. *Proceedings of International Conference on Electrochemical Sensors*, p. 88., Dobogókő, Hungary, **2008**.
3. *Solid State Gas Sensing*, E. Comini et al. (eds.), Chapter 7, Springer Science + Business Media, LLC **2009**.
4. Dücső, Cs.; Ádám, M.; Fürjes, P.; Hirschfelder, M.; Kulinyi S.; I. Bársony, I. *Sensors and Actuators B* **2003**, *95*, 140-144.
5. Fürjes, P.; Légrádi, G.; Dücső, Cs.; Aszódi, A.; Bársony, I. *Sensors and Actuators A* **2004**, *115*, 417-423.
6. Horvath, R.; Cottier, K.; Pedersen, HC.; Ramsden, JJ. *Biosensors and Bioelectronics* **2008**, *24*, 799-804.
7. Nagy, N.; Volk, J.; Tóth, A. L.; Hámori, A.; Bársony, I. *Élet és Tudomány* **2006**, *36*, 1130-1133.
8. Hámori, A.; Nagy, N. *Third IEEE International Conference on Sensors*, IEEE Sensors **2004** ISBN: 0-7803-8693-0; Catalog Number: 04CH37603C; p.1333.
9. Volk, J.; Hakansson, A.; Miyazaki, HT.; Nagata, T.; Shimizu, J.; Chikyow, T. *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *92*, 183114.

intensive cross-talk between the different disciplines are crucial in this emerging field. With the improvement of basic concepts of detection and processing technology, together with new techniques, like nanoimprint lithography, integrated analytics has a great potential to become part of our daily life in the very near future.