

PROTONNYALÁBOS MIKROMEKMUNKÁLÁS: EGY ÚJ, DIREKT ÍRÁSOS, 3-DIMENZIÓS LITOGRÁFIÁS ELJÁRÁS

Rajta István
MTA Atommagkutató Intézete, Debrecen

Az ATOMKI 5 MV-os Van de Graaff-gyorsítójának nyalábjára telepítve 1994 óta működik egy pásztázó ionmikroszkop [1]. Az OTKA Műszerközpont pályázatán elnyert támogatással felépített nyalábcatorna a gyorsító ionnyalábját $\sim 1 \mu\text{m}$ átmérőjűre fókuszálja, és pásztázó rendszerét alkalmassá teszi a vizsgálandó minták ilyen felbontással történő vizsgálatára. A berendezés első tíz évében különböző ionnyaláb-analitikai módszerekkel, különböző tudományos területek művelőivel kialakított együttműködések keretében interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat végeztünk (geológiai, archeológiai, biológiai és anyagtudományi alkalmazások, légköri aeroszolok egyedi szemcseanalízise).

Az ionnyaláb-analitikai módszerek közül először a PIXE (proton-indukált röntgenemisszió) módszert valósítottuk meg. Később az RBS (Rutherford-visszaszórás), PIGE (proton-indukált gamma-emisszió), DIGE (deuteron-indukált gamma-emisszió), STIM (pásztázó transzmissziós ionmikroszkópia), IBIC (ionnyalábbal indukált töltésmikroszkópia) módszereket is bevezettük, hogy közülük mindig az adott feladatnak legjobban megfelelő kombinációt alkalmazhassuk.

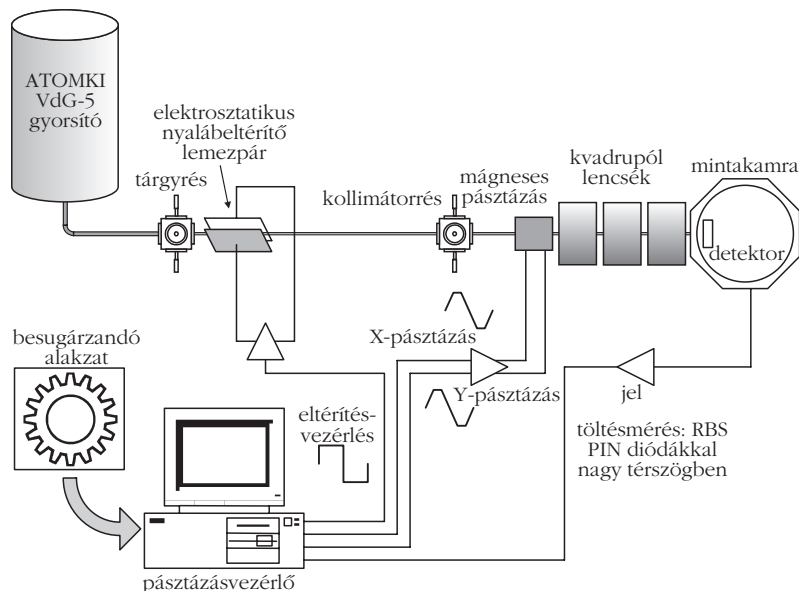
2002 óta egy új alkalmazási lehetőséggel bővült a paletta: meghonosítottuk a protonnyalábos mikromegmunkálást [2], amely egy új, direkt írásos, 3-dimenziós litográfias eljárás. Az angol nyelvű szakirodalomban jelenleg elterjedt elnevezése a Proton Beam Micromachining (PBM), illetve a P-beam Writing (PBW). Míg az

analitikai feladatoknál a gyűjtött jelekből nyerhetünk a mintára jellemző információt (általában képszerű formában: elemösszetétel, mélységi profil, sűrűségterkép stb.), a PBW esetében a kép szolgál bemenő adatként: ennek megfelelő pálya mentén mozgatjuk az ionnyalábot a minta felületén, és így alakítunk ki szelektív módosítást az anyagban. A pásztázó ionmikroszkop felépítését és a protonnyalábos mikromegmunkáláshoz való alkalmazását az 1. ábra mutatja.

A protonnyalábos mikromegmunkálás módszerét röviden a következőképpen foglalhatjuk össze: fókuszált $\sim\text{MeV}$ energiájú ionnyalábot egy alkalmas anyagra (ezt a litográfiaiában rezisztnek nevezik) pásztázunk, majd az ionok által létrehozott primer roncsolási képet kémiai eljárással előhívjuk. Ez az anyag alapvetően kétféle lehet, az ionoknak az anyaggal való kölcsönhatása alapján pozitív és negatív reziszt anyagokat különböztetünk meg. Pozitív polimer rezisztben láncaprózódás történik, az előhívás során a besugárzott területről eltávolítjuk az anyagot. Negatív polimer rezisztben is felszakadnak a polimerláncok, és egy utólagos hőkezeléssel térhálósodást hozunk létre. Ezután az előhíváskor a besugárzott területek megmaradnak, a besugárzatlan területről pedig eltávolítódik a rezisztanyag. A folyamat a 2. ábrán látható.

Pozitív reziszt alkalmazható vastag (tömbi) anyagként, vagy egy alkalmas hordozón vékonyréteggént is. Negatív reziszt esetében biztosítani kell a hordozót, valamint a reziszt és a hordozó közötti jó tapadást, ellenkező esetben az előhívás során az oldószerben úszó mikrostruktúrákat kapunk. További lehetőség az ábrán jelölt galvanizálás. Ezzel a módszerrel a polimerben előállított forma negatívját fémből is el tudjuk készíteni. Az így előállított bélyegző pedig sorozatgyártásra használható. Bizonyos pozitív rezisztkeknél (mint például az ábrán mutatott PMMA (polimetil-metakrilát) esetén) a besugárzás hatására a mintában törésmutató-változás jön létre. Ha az előhívást nem végezzük el, akkor ezt a megváltozott törésmutatót kihasználva hullámvezetők kialakítása is lehetővé válik, ami integrált optikai eszközöknek lehet az egyik legfontosabb építőeleme. A „reziszt” kifejezést a fotolakknál általánosabb értelemben használjuk: egyrészt nemcsak vékonyréteg „lakk” formája lehet, hanem akár vastag tömbi anyag is. Másrészt a különböző összetételű poli-

1. ábra. A protonnyalábos mikromegmunkáláshoz szükséges pásztázó ionmikroszkop felépítése



mereken kívül bizonyos típusú üvegek (pl. Foturan™) vagy szilícium is megmunkálható.

A mintázatok létrehozására alkalmas módszereket két nagy csoportra oszthatjuk: a maszkot használó módszerek tömegtermelésre alkalmasak, a direkt írásos módszerek pedig nem igényelnek maszkot ezért leginkább prototípusok készítésére használják őket.

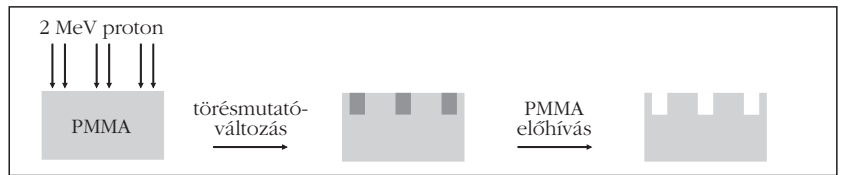
Az iparban jelenleg legelterjedtebben használt módszer a fotolitográfia, az előállítható vonalszélesség folyamatos csökkentése érdekében a felhasznált hullámhossz csökkentése szükséges (optikai, UV, EUV, röntgen). Nagy probléma a besugárzandó mintázatot tartalmazó megfelelő maszk előállítása, illetve a röntgentartomány esetén a megfelelő forrás biztosítása (szinkrotron).

Direkt írásos módszerek esetében elektronokat (Electron Beam Lithography – EBL), kis energiájú nehéz ionokat (Focused Ion Beam – FIB) vagy MeV energiájú könnyű ionokat használhatunk (PBW). Létezik maszkos ionnyalábos módszer is, ezt ionleképezéses litográfiának nevezik (Ion Projection Lithography – IPL). Ennek az a jelentősége, hogy ki tudja használni az ionok és az anyag közötti kölcsönhatás jellegéből adódó előnyöket, míg a maszkos levilágítás lehetővé teszi az olcsó tömegtermelés megvalósítását.

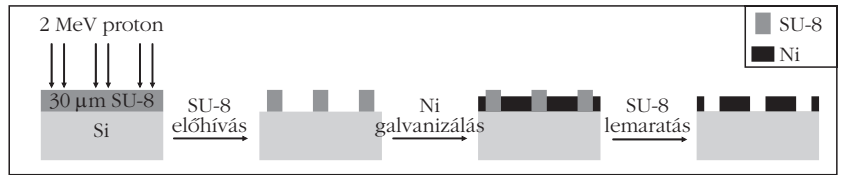
Természetesen nem szabad elfeledkezni a lézeres mikromegmunkálásról sem. A módszer egyik érdekessége az, hogy direkt írásos módszerként vagy maszkos módszerként is alkalmazható. Direkt írás esetén a fókuszált lézernyaláb rögzített helyen áll, ekkor a megmunkálandó mintát kell megfelelő pontossággal ($\leq 1 \mu\text{m}$) mozgatni. A maszkos módszer esetén pedig egy maszkot képezünk le a megmunkálandó felületre, ilyenkor speciális maszkra és lencserendszerre van szükség.

A FIB-módszerrel szinte bármilyen anyag megmunkálható, mert a megmunkálandó anyag atomjait porlasztással távolítja el. Azonban célszerű, ha a megmunkálandó anyag elektromos vezető, ellenkező esetben töltődési problémák jelentkeznek, a nyaláb

Pozitív reziszt: PMMA (polimer-metakrilát, plexiüveg)



Negatív reziszt: SU-8 (biszfenol-A-glicid-éter)



2. ábra. A mikromegmunkálás folyamata

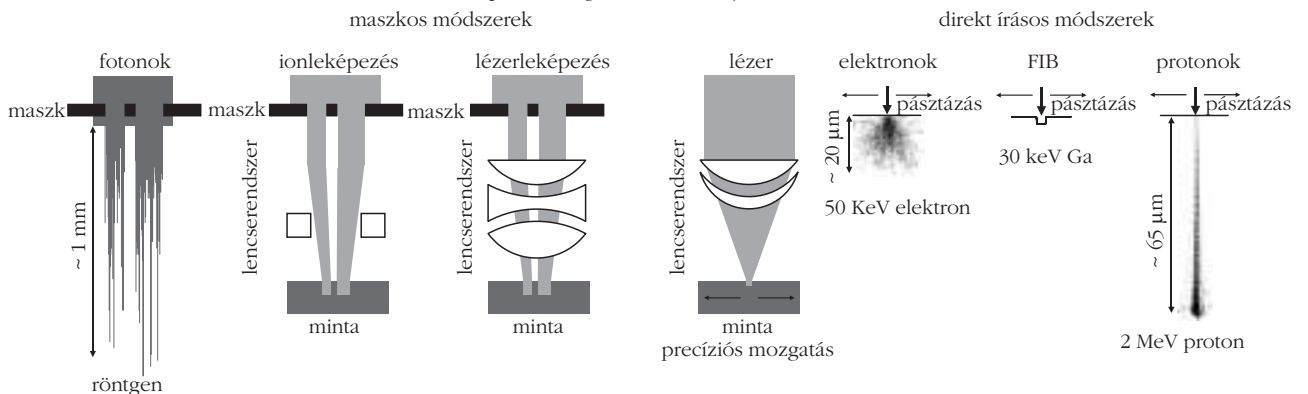
defókuszálódhat. Háromdimenziós struktúrák kialakítása úgy lehetséges, hogy a nyalábot egy adott helyen hosszabb ideig tartjuk, így egy adott pont folyamatos eróziója biztosítja a kívánt mélységet. Ez azonban meglehetősen lassúvá teszi az eljárást. A módszer hatékonysága, a porlasztás sebessége javítható bizonyos reaktív gázok (pl. klór) bevezetésével. Más gáz bevezetésével porlasztás helyett irányított lerakódás is megvalósítható (FIB kémiai gőzfázisú leválasztás).

A különböző litográfiai módszereket összehasonlítva, az adott módszereknél szerepet játszó fizikai folyamatokat elemezve megállapíthatók a PBW-módszer jellemzői (ld. 3. ábra). Gyors (MeV energiájú) ionoknak az anyaggal való kölcsönhatása néhány különleges tulajdonsággal rendelkezik:

- Az ionnyaláb egyenes úton halad, kivéve a pálya végén megjelenő kiszélesedést. Ez lehetővé teszi, hogy ionokkal nagy oldalarányú 3-dimenziós struktúrákat állítsunk elő. Elektronnyalábos litográfiával ez nem lehetséges, mert a jól fókuszált elektronnyaláb nagymértékben szóródik az anyagba való belépéskor, így alakul ki a tipikus körte alakú besugárzott térfogat.

- Az ionnyaláb által leadott energia a mélységgel lassan változik, bizonyos esetekben szinte állandónak tekinthető, kivéve egy jelentős csúcsot (Bragg-csúcs) az ionok hatótávolságának végénél. Ez a tulajdonság biztosítja, hogy a mélység mentén egyenletes roncsoló hatás jöjjön létre. Optikai litográfiai módszereknél (UV, röntgen stb.) ezzel szemben a leadott energia a

3. ábra. Különböző típusú besugárzások fizikai jellemzőinek összehasonlítása



mélységgel exponenciálisan csökken. Vastag rezisztanyagok esetén felmerül az a probléma, hogy a felületi réteg már túlexponált lesz, míg a mélyebben lévő anyag még nem kapott elegendő besugárzást.

- Az ionnyalábok jól meghatározott behatolási mélységig jutnak el az anyagban, és ez a mélység hangolható az ionok energiájával. Ez az egyedülálló jellemző lehetővé teszi többrétegű (azaz 3-dimenziós) struktúrák kialakítását egyetlen reziszt rétegben.

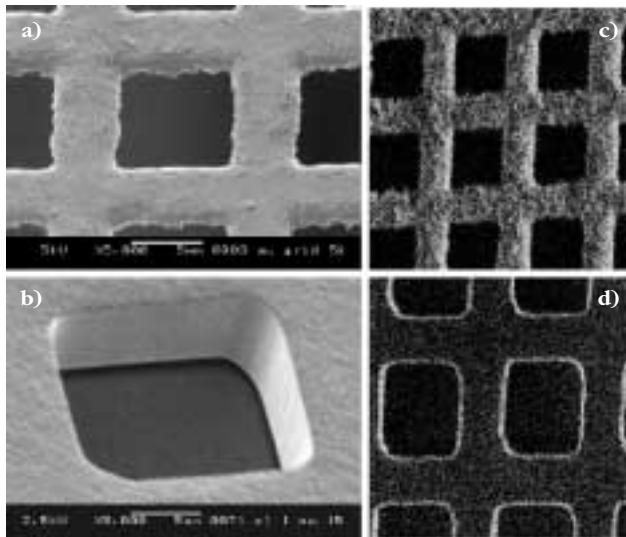
- Könnyű ionok használata esetén elhanyagolhatóan kevés nagy energiájú szekunder elektron keletkezik, amelyek jelenléte a reziszt nem kívánt exponálását eredményezné. Ez az EBL-módszer esetén úgynevezett közelhatást okoz.

Jelenlegi világszínvonalú eredmények

A PBW-módszert a szingapúri egyetemen fejlesztették ki *F. Watt* és munkatársai, és ebben a munkában a jelen cikk szerzője is részt vett [3, 4]. Ennek a fejlesztő munkának a során többször is „nyalábméret-világrekordot” sikerült elérni. A „nagyáramú” mikronyalábméretű (μ-PIXE, μ-RBS stb.) esetén 290×450 nm²-es nyalábméretet, (50 pA bombázó nyalábarám mellett [5]), „kis áramú” technikák (STIM, ionlumineszcencia, szekunder elektronemisszió stb.) esetén 35×75 nm²-es nyalábméretet (5000 Hz protonbeütésszám mellett [6]).

Ezen világrekorder nyalábméretetek eléréséhez szinte minden területen fejlesztésekre volt szükség. A szingapúri egyetemen telepített új gyorsító, a *Singletron* stabil nyalábot szolgáltat. Az új generációs oxfordi kvadrupól triplett lencserendszer mágnesével a

4. ábra. PBW-módszerrel készült rács szubmikronos ionnyalábok méretének meghatározásához. (a) a kereskedelmi forgalomban kapható „2000 mesh” aranyrács elektronmikroszkópos képe, (b) a PBW-rács elektronmikroszkópos képe azonos nagyítás esetén, (c) az aranyrács képe protonnyalábbal, (d) a PBW-rács képe protonnyalábbal azonos paraméterek esetén. Látható, hogy a PBW-rács sokkal jobb minőségű, ezen a mintán mért vízszintes és függőleges nyalábprofilokon végzett pontos kiértékelésekkel határoztuk meg a világrekord nyalábméreteteket.



korábbiakhoz képest jelentős javulást értünk el. A nyaláb alakját meghatározó rések (tárgyrés, kollimátorrés) tisztítása, illetve új réspofák használata is elengedhetetlen. Közvetlenül a tisztítások után minden alkalommal reprodukálható volt a 30–50 nm-es nagyságrendű nyalábméret. Egy hónapos használat után a résekkel még 100–200 nm feloldás rutinszerűen elérhető. Természetesen rezgésmentes környezetre van szükség. A mechanikai rezgéseken túl nagyon fontos az elektromos és mágneses zajok kiküszöbölése is. Tiszta nagyvákuum szükséges, amelynek eléréséhez mágneses felfüggesztésű turbószivattyúkat használtunk. Új kamrát is terveztünk: erre az erős kicsinyítéshez tartozó kisebb munkatávolság miatt volt szükség, továbbá ebbe a szabványos „6-inch wafer” is belefért. Ezek a követelmények mind egyre szigorúbbakká váltak a nyalábméret csökkentésével.

Alkalmazások

A fentebb említett litográfiai módszerek néhány jellemzőjükben annyira különböznek egymástól, hogy ezáltal egy adott feladat megvalósítása szempontjából mindig megválasztható az ahhoz legmegfelelőbb módszer. Bizonyos esetekben néhány módszer együttes alkalmazása is szükséges lehet, ilyenkor a módszerek egymást kiegészítő jellegét kell hangsúlyozni.

Az ionnyalábokat alkalmazó módszerek közül a FIB rendelkezik a leghosszabb múlttal, és mostanra már a kereskedelmi forgalomba is bekerült. Ezek miatt mindeddig éppen a FIB-módszer talált legtöbb alkalmazási területre. Az egyik legfontosabb alkalmazási terület a félvezetőiparban a minőségellenőrzés és hibaanalízis. Egy másik pedig a sérült (foto)maszkok javítása.

Mivel az ion-leképezéses litográfia (IPL) maszkos módszer, így tömegtermelésben használható felületi mintázat kialakítására. A PBW-hez hasonlóan az IPL is a módszer kifejlesztésének viszonylag korai szakaszában van, így az alkalmazási területeinek jelentős részét a prototípus-készítés és a módszer képességeinek vizsgálata, demonstrációja jelenti.

A PBW-módszer a számottevő, jól definiált behatolási mélységnek és a mintában keletkező egyenes iontrajektóriáknak köszönhetően kifejezetten alkalmas pontos, nagy oldalarányú 3-dimenziós struktúrák készítésére. Jelenleg még nem kapható kereskedelmi forgalomban PBW-célberendezés, ezért ezt a módszert világszerte a pásztázó ionmikroszkopos laboratóriumokban használják: a litográfiai alkalmazások a mikroszkopos analitikai alkalmazásai mellett egyre jelentősebbé válnak. Direkt írásos jellege miatt maszkvagy prototípus-készítés esetén ideális módszer.

A PBW-módszer egy konkrét alkalmazásaként nyalábméret mérésére használható rácsot készítettünk (4. ábra), amely sokkal jobb minőségű a jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható egyéb rácsoknál. Pásztázó ionmikroszkopon a nyalábméretet hagyományosan a „2000 mesh” (12,7 μm) rácsállandójú arany

vagy réz rácson szokásos mérni. Ezeknek a rácsoknak azonban nem megfelelő minőségű a felülete, ezért a ténylegesnél rosszabb nyalábméretet határozunk meg velük. Ahhoz, hogy a szubmikronos nyaláb méretét meg tudjuk mérni, jobb minőségű feloldásmérésre van szükség. Szilícium hátlapra felvitt vékony rétegű SU-8 rezisztanyagba négyzetes oszlopstruktúrákat készítettünk, majd a mintát nikkellel galvanizáltuk, és a megkötött SU-8 eltávolítása után a szilícium felületén fémrácsot kaptunk. A rácsot a szilícium hátlapról leválasztottuk, így öntartó, átlátszó rácsot kaptunk, amely a kívánt feloldásmérésre kiválóan alkalmas volt. Ez volt a PBW-módszer első olyan alkalmazása [5], amelynek eredményeképpen a szingapúri csoport ezt a rácsot azóta már megrendelésre is készíti, és jelenleg kereskedelmi forgalomban is árulja.

Jövőbeli lehetőségek

Gordon E. Moore 1965-ben fogalmazta meg híressé vált és még évtizedekkel később is helytálló jóslatát, miszerint az integrált áramkörök összetettsége körülbelül másfél évenként meg fog duplázódni. Ennek az az egyik következménye, hogy a számítógépek ára egyre csökken, így többet adnak el belőlük a világpiacra, és ebből finanszírozzák a szükséges technológiai fejlesztéseket. A félvezetőiparban történő fejlesztések eredményeként (az alkatrész méretek csökkentésével) egyre több tranzisztort zsúfolnak egy adott felületű szilícium lapkára. A fellépő diffrakciós problémákat az optikai litográfiában az alkalmazott hullámhossz csökkentésével lehetett egy ideig orvosolni. A diffrakciós jelenségeket már a tervezésnél figyelembe véve ma már a hullámhossznál kisebb alkatrész méretek is megvalósíthatóak. A Moore-törvény következménye az is, hogy a technológiai fejlesztésekhez szükséges pénzüsszeg is exponenciálisan nő az évek során. A múltban már sokszor gondolták azt, hogy ez az exponenciális fejlődés meg fog állni, de újabb és újabb technológiák bevezetésével eddig mégis mindig megtörtént a „csoda”. (2005-ben Moore kijelentette egy interjúban, hogy a törvény már nem lesz érvényes sokáig, mivel szerinte az atomi méretekhez érve a tranzisztorok el fogják érni miniaturizálásuk határait.)

Bár a Moore-törvény először egy megfigyelést és előrejelzést írt le, minél szélesebb körben lett ismert, annál inkább célként jelent meg az egész ipar számára. A félvezetőgyártók marketing- és kutató részlegei hatalmas energiákat fordítottak arra, hogy teljesítsék a meghatározott növekedési szinteket, amelyet a versenytársaik vélhetően el fognak érni. Az évente megjelenő ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) számítástechnikai technológiai ütemterv szerint a Moore-törvény még jónéhány integráltáramkör-generációra érvényes lesz. Nemcsak a chipgyártásban használt optikai litográfia, hanem más területek (MEMS – mikro-elektromechanikai rendszerek, nanofotonika, molekuláris nanotechnológia, lab-on-a-chip rendszerek stb.) is profitálhatnak abból, hogy a szokásos módszerektől eltérő, új eljárásokat is használni fognak az iparban. A direkt írásos módszereket sokáig túlságosan lassúnak tekintették a tömegtermelés igényeihez képest, azonban ezeknek a módszereknek sok előnyös tulajdonságát lehet kihasználni az úgynevezett nanoimprinting litográfiai technológiával kombinálva. Az utóbbi módszer lényege az, hogy az eredeti mintázatot átviszi egy másik felületre, és ezt sorozatban is képes megtenni 100 nm alatti méretek esetén is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás megvalósulását az OTKA A080, M041939, M36324 és F42474 számú, a TÉT GR-3/03 számú pályázati támogatások, valamint a szerző Bolyai János Kutatási Ösztöndíja (2002–2005 között) segítették.

Irodalom

1. Rajta I., *A pásztázó proton mikroszkop telepítése és tudományos alkalmazásai*. PhD disszertáció. Debrecen, Atomki (1996)
2. Rajta I., Gómez-Morilla I., Abraham M.H., Kiss Á.Z., Proton beam micromachining on PMMA, Foturan and CR-39 materials. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 260
3. van Kan J.A., Rajta I., Ansari K., Bettiol A.A., Watt F., Nickel and copper electroplating of proton beam micromachined SU-8 resist. *Microsystem Technologies* 8 (2002) 383
4. Sum T.C., Bettiol A.A., Seng H.L., Rajta I., van Kan J.A., Watt F., Proton beam writing of passive waveguides in PMMA. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 266
5. Watt F., Rajta I., van Kan J.A., Bettiol A.A., Osipowicz T., Proton beam micromachined resolution standards for nuclear microprobes. *Nucl. Instr. and Meth. B190* (2002) 306
6. Watt F., van Kan J.A., Rajta I., Bettiol A.A., Choo T.F., Breese M.B.H., Osipowicz T., The National University of Singapore high energy ion nano-probe facility: Performance tests. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 14

ÚJ SZERKEZETI ANYAGOK LÍTIUM AKKUMULÁTOROK SZÁMÁRA

Az Argonne Nemzeti Laboratórium kutatói új módszert fejlesztettek ki az újra tölthető lítiumion-akkumulátorok kapacitásának és stabilitásának a növelésére. A technológia alapja egy új anyag – egy különleges nanokristályos szerkezetű, réteges kompozit – amelyből a pozitív elektróda készül. A kétkomponensű kompozitszerkezet aktív része, amely a töltést tárolja, egy inaktív komponensbe van építve, amely a szerkezetet stabilizálja. Az új találmányt először az

Amerikai Elektrokémiai Társaság május 6–10. között, Chicagóban rendezett ülésén mutatták be. A vizsgálatok szerint az új anyagnak kivételesen magas a tárolókapacitása, 250 mAh/g, a hagyományos anyagokénak több mint a kétszerese. Ezek az anyagok magas mangántartalmúak, ezért lényegesen olcsóbbak a belőlük készített akkumulátorok, mint a széles körben használt kobalt–nikkel tartalmú változatok.

(www.anl.gov)