

Bevezetés

A szilárdtestfizikai - anyagtudományi kutatások a fizika tudományának fontos részét képezik, és igen szerteágazóak. Így például a porózus szilícium előállítása és tulajdonságainak tanulmányozása; a vékonyrétegek előállításához alkalmazott lézeres leválasztási eljárások (pl. lézeres direktírás, impulzuslézeres elgőzölögtetés) optimalizálása, elméleti leírása; amorf Si/Ge multirétegekben a kölcsönös diffúziós folyamatok tanulmányozása; három, egymástól nagyon is különböző hazai kutatási irányt jelent, mégis részei ennek a tudományterületnek.

Az utóbbi évek egyik széles körben kutatott anyaga a porózus szilícium. Ennek egyik oka a porózus szilícium fotolumineszcenciát mutató tulajdonsága, amely alapján lehetővé válik a mikroelektronika szempontjából legjelentősebb elem, a szilícium optoelektronikai (pl. napelemekben való) felhasználása. Jelentős továbbá az, hogy a porózus szilícium termikus oxidációjára alapozva az integrált áramkörökben szigetelőként alkalmazott SOI (Silicon On Insulator) egységek előállítása is lehetséges, de megvalósították már mikrométeres méretű alkatrészek ionnyalábbal történő előállítását (micromachining) is ezen anyagból kiindulva. Hatalmas belső felülete miatt ($200\text{-}600\text{ m}^2/\text{cm}^3$) a porózus szilícium pedig jól alkalmazható gázabszorbensként is.

A nem sztöchiometrikus ón-oxid, a nagy tiltottsáv-szélességű félvezető oxidok családjának egyik tagjaként, az optikai és elektromos tulajdonságok egyedülálló kombinációjával rendelkezik. Jó infravörös reflexiója nagy látható tartománybeli transzmisszióval és a fémekét megközelítő elektromos- és hővezetőképességgel párosul. Jóllehet számos

alkalmazás igényelné az ilyen oxidok vékonyréteg-mintázat formájában történő előállítását (melyek közül csupán kiragadott példák a folyadékkristályos kijelzők átlátszó vezető kontaktusainak gyártása, vagy az oxigén-, illetve alkoholérzékelő berendezések) eddig nem volt olyan technológia, mely ezt a feladatot egy lépésben elvégezné.

A vékonyrétegek előállításának egyik módja az impulzuslézeres elgőzölögtetés (Pulsed Laser Deposition, PLD), ahol a lézer hőhatásának eredményeként szilárd vagy olvadék halmazállapotú céltárgy ablációja révén vékonyrétegeket lehet felvinni egy hordozóra. Szemben a hagyományos vákuumpárológatásos módszerrel, itt a nagyon különböző olvadáspontú fémekből is elég jól meghatározott összetételű rétegeket lehet előállítani, mivel a PLD-vel készült réteg sztöchiometriája elég jól reprodukálja a céltárgyét. A módszer hátránya azonban, hogy leválasztás közben a vákuumból szennyező anyagok is a rétegbe kerülhetnek. Másrészt az előállított rétegben az összetevők eloszlása nem mindenhol homogén, mind laterálisan mind az erre merőleges irányban sem.

Az ipari felhasználás szempontjából ígéretes tulajdonságaik miatt az utóbbi évek egyik intenzíven kutatott szerkezetei a multirétegek. Előnyös tulajdonságaik mellett azonban a gyakorlati felhasználás szempontjából hátrányt jelent, hogy jelentős szabadenergiafelesleggel rendelkeznek és így hajlamosak a különböző átalakulásokra (amorf-kristályos átmenet, különböző reakciók, diffúziós keveredés). Így elektronikai vagy optikai alkatrészekbe való beépítésük előtt alapvetően szükséges a multirétegek stabilitásának a vizsgálata, a szerkezeti változások leírása és az azt kiváltó hatások értelmezése.

Célkitűzések

- A nukleáris mikroszonda és a Rutherford-visszaszórásos spektrometria ötvözése a vizsgálandó minták felületi egyenetlenségének tanulmányozására. Új eljárás kidolgozása Si és Si-alapú minták felületi topográfiájának gyors és egyszerű meghatározására, amellyel többek között lehetőség van a mikroelektronikai iparban alkalmazott áramkörti elemek gyors és egyszerű analizésére hibakeresés vagy minőségellenőrzés céljából
- Implantált porózus szilíciumban a tömörödésért felelős folyamat felderítése, ehhez a porozitás mélységi eloszlásának a meghatározása. Mindehhez új mérési eljárás kidolgozása, mivel a behatoló ionok nem érzékenyek a pórusokat kitöltő vákuumra.
- A modellrendszerként és/vagy kis szériaszámú gyártásban széleskörűen elterjedt lézeres direktírás és impulzuslézeres elgőzölögtetés közös jellemzője, hogy a szilárd testek felszínén a kívánt fizikai ill. kémiai változásokat lokalizáltan, csak a lézerrel megvilágított területre korlátozva idézik elő, így a leválasztási folyamat jól irányítható és reprodukálható. Mindkét eljárással leválasztott minták mikro-RBS analizésének az elvégezése a leválasztási folyamatok elméleti leírása és paramétereinek meghatározása céljából.
- Amorf szilíciumból és amorf germániumból felépített multirétegek esetében a hőkezelés hatására létrejövő diffúziós folyamatok tanulmányozása nagy mélységfeloldású Rutherford-visszaszórásos spektrometria alkalmazásával. Egymást követő hőkezelések és RBS mérések során a rétegstruktúra változásainak a követése mind az

összetevők mind a vastagság (periodicitás) szempontjából, a kölcsönös diffúziós együttható meghatározása céljából.

Alkalmazott kísérleti módszerek és eszközök

A MTA Atommagkutató Intézetében 1995 év elejétől működik hazánkban egyedülálló berendezésként a pásztázó nukleáris mikroszkop, amely kezdetben a geológiai és archeometriai kutatásokhoz nyújtott segítséget a PIXE (Particle Induced X-ray Emission) módszer alkalmazásával. Az anyagtudományi kutatások esetén azonban mindenekelőtt a mélységi analízisre is alkalmas Rutherford-visszaszórásos spektrometria (Rutherford-backscattering, RBS) terjedt el. A kitűzött feladatok megvalósításához ezért először ezt a módszert kellett intézetünkben meghonosítani, adaptálni a nukleáris mikroszkop speciális körülményeihez és biztosítani a rutinszerű használatát.

Fejlesztőmunkám eredményeként megvalósult a mikronyalábbal kombinált Rutherford-visszaszórásos spektrometria a nukleáris mikroszkop mérőrendszeren. Ennek keretében Cornell- vagy IBM-geometriában elhelyezett részecskedetektorral kvalitatív és kvantitatív elemanalízis végezhető. A hagyományos RBS-mérések mellett a felületi topográfiai vizsgálatokhoz kifejlesztett detektortartókkal egyidejűleg két, egymástól függetlenül mozgatható detektorral, mérés közben is változtatható visszaszórási szöggel végezhető analízis. Új, a függőleges tengely körül forgatható mintatartó beépítésével pedig a súrlódó beesési szögnél végzett mérések is elérhetővé váltak. Ennek elsősorban a mélységfeloldás növelésénél van jelentősége, mivel így a hagyományos geometriáknál szokásos felületi 10-20 nm-es mélységfeloldás 2-5 nanométerre javítható,

ami már alkalmas a nanométeres vastagságú vékonyrétegek mélységi analízisére is. A spektrumok kiértékelését a hazai fejlesztésű RBX programcsomaggal végeztem, míg más adatfeldolgozásokhoz egyéb programokat (MDEPTH, TRIM, 3D_MANAGER) használtam.

Tézisek

Új tudományos eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Új eljárást vezettem be mikronyalábbal végzett Rutherford-visszaszórásos technikával, súrlódó szögű detektorelrendezést alkalmazva szilícium és szilícium alapú összetett szerkezetű minták felületi topográfiájának a vizsgálatára. Többféle felületi struktúránál értelmeztem az elemtérképeken és tomográfiás képeken mutatkozó árnyékhatásokat, amelyekkel a felületi egyenetlenségek a spektrum szimulációja nélkül és viszonylag egyszerű módon kimutathatók. 70-100 μm mély üregekre és néhány mikrométeres kiemelkedésekre megmutattam, hogy az elemtérképek alapján hogyan határozható meg számszerűen a térbeli szerkezetek mérete. (1., 2. és 3. közlemény)
2. Meghatároztam implantált porózus szilíciumban a porozitás számszerű értékét az implantáció mélysége mentén mikronyalábbal végzett RBS analízisekkel. Megállapítottam, hogy az implantáció a pórusok betömörödését eredményezte, de nem folyamatosan a behatoló ionok pályája mentén, hanem azoknak az effektív hatótávolságánál. Ez a

tény azt mutatja, hogy a tömörödést okozó fizikai folyamat a nukleáris fékeződés. A módszer jelentőségét az adja, hogy másfajta porózus szerkezetre is alkalmazható, és a szokásos porozitás- meghatározásokhoz képest roncsolásmentes vizsgálatot tesz lehetővé. (4. közlemény)

3. Lézeres direktírással létrehozott SnO_x csíkok esetében mikro-RBS mérésekkel meghatároztam a kvalitatív elemösszetételt a csíkokon belül és azokon kívül. Az ön elemtérképek alapján meghatároztam a csíkok méretét, amelyek a lézer teljesítményétől függően $26 \pm 2 \mu\text{m}$ és $42 \pm 2 \mu\text{m}$ közötti szélességűek voltak. Méréseim alapján megállapítható volt, hogy a kidolgozott új lézeres leválasztási eljárás jól szabályozható és reprodukálható vékonyréteg mintázatok előállítására. (5. és 6. közlemény)
4. RBS módszerrel, mikrométeres laterális feloldással meghatároztam az alkotóelemek eloszlását és a réteg összvastagságát impulzuslézeres elgőzölögtetéssel létrehozott monoelemes Sn, In, Bi és Sn-Bi ötvözet vékonyrétegek esetén. Mérési adataimmal lehetővé vált a leválasztási folyamat elméleti leírása és paramétereinek a meghatározása. Eredményeim alapján az indium és ón rétegekben a vastagságprofilok szimmetrikusak voltak, azok Lorentz-szerű függvénnyel illeszthetők, a számolt illesztési paraméterek pedig $k_x = k_y = 0,58$. A Bi vastagságprofil szimmetrikustól eltérő viselkedése további vizsgálatot igényel. (7. közlemény)
5. Rutherford-visszaszórásos analízissel amorf Si/Ge multirétegek nagy mélységfeloldású kvalitatív és kvantitatív elemzését végeztem el. Egymást követő hőkezelések és RBS analízisek során meghatároztam a

rétegszerkezetet mind az összetevők mind a vastagság (periodicitás) szempontjából. Méréseim alapján a számolt diffúziós együtthatók: $\tilde{D} = (4,35 \pm 0,22) \times 10^{-22} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a szilícium tiszta germániumban való diffúziójára vonatkozóan, míg a folyamat végén $\tilde{D} = (4,55 \pm 0,25) \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, ami a $\text{Si}_{0,2}\text{Ge}_{0,8}$ ötvözetben való diffúzióra jellemző. Elvégeztem továbbá a mért spektrumok számoltakkal való illesztését, amely során a rétegszerkezetre vonatkozó szimulációk a Si gyors homogenizációját mutatták a Ge rétegben. (8. közlemény)

Az értekezés témakörében megjelent saját közlemények

1. A. Simon, F. Pászti, I. Uzonyi, A. Manuaba, Á.Z. Kiss, *Effect of surface topography on scanning RBS microbeam measurements*, Vacuum, Vol. 50, No. 3-4, (1998) 503-506.
2. A. Simon, F. Pászti, I. Uzonyi, A. Manuaba, Á.Z. Kiss, I. Rajta, *Observation of surface topography using an RBS microbeam*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 136-138 (1998) 344-349.
3. A. Simon, F. Pászti, I. Uzonyi, A. Manuaba, Á.Z. Kiss, *Application of grazing exit angle in RBS microprobe measurements*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 136-138 (1998) 350-356.
4. A. Simon, F. Pászti, A. Manuaba, Á.Z. Kiss, *3-dimensional scanning of ion-implanted porous silicon*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 158 (1999) 658-664.

5. T. Szörényi, Zs. Geretovszky, J. Tóth, A. Simon, Cs. Cserhádi, *Laser direct writing of tin oxide patterns*, Vacuum Vol. 50 No. 3-4 (1998) 327-329.
6. T. Szörényi, Zs. Geretovszky, L. Kelemen, J. Tóth, A. Simon, *Tin-oxide pattern deposition by laser direct writing*, SPIE Vol. 3404 (1998) 173-177.
7. Z. Kántor, T. Szörényi, Zs. Tóth, A. Simon, L. Gombos, *Analysis of thickness profiles of pulsed laser deposited metal films*, Applied Surface Science 138-139 (1999) 599-604.
8. A. Simon, A. Csik, F. Pászti, Á.Z. Kiss, D. L. Beke, L. Daróczi, Z. Erdélyi, G.A. Langer, *Study of interdiffusion in amorphous Si/Ge multilayers by Rutherford backscattering spectrometry*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, 161-163 (2000) 471-475.

Egyéb közlemények:

9. J. Slotte, A. Laakso, T. Ahlgren, E. Rauhala, R. Salonen, J. Räisänen, A. Simon, I. Uzonyi, Á.Z. Kiss, E. Somorjai, *Influence of surface properties on the diffusion profiles obtained by Rutherford backscattering spectrometry*, Journal of Applied Physics, Vol. 87 No. 1. (2000) 140-143.