

# Zárójelentés

D 048594 ny. számú posztdoktori kutatási szerződés

Témavezető: *Dr. Csík Attila*

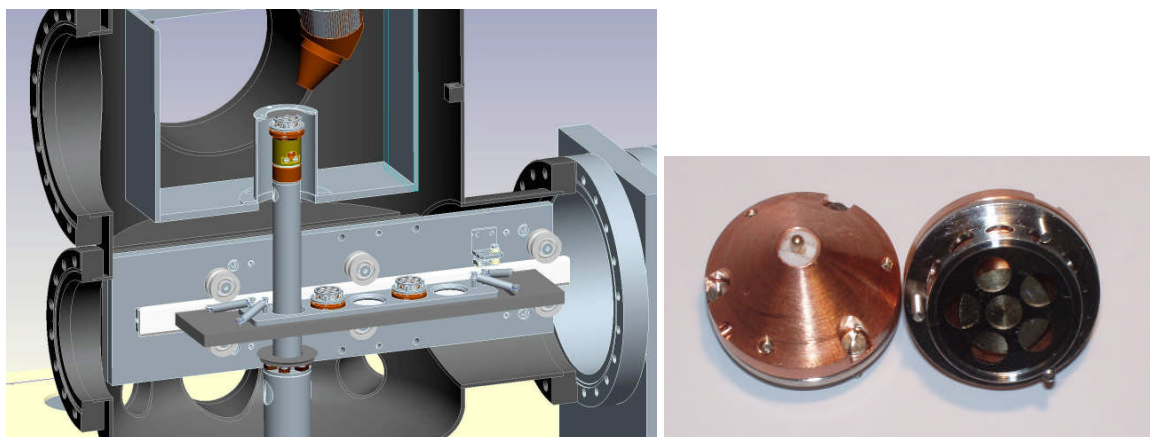
Vezető kutató: *Dr. Beke Dezső*

Kutatási téma címe: *Határfelületek kialakulása és mozgásuk vizsgálata nanoskálán*

A vékony, néhány nanométeres multirétegek termikus stabilitásának kutatása a szilárdtest fizika és az anyagtudomány egyik intenzíven kutatott területe. Termikus stabilitásuk ismerete nemcsak alapkutatás, hanem az alkalmazások szempontjából is érdekes és fontos a vékonyrétegeket tartalmazó eszközök élettartamának előrejelítésében. A D048594 OTKA posztdoktori kutatási program keretében a nanoméretű vékonyrétegekben-multirétegekben lejátszódó szilárdtest reakciók illetve diffúziós folyamatok néhány fontos alapkérdésével foglalkoztunk. A pályázat ideje alatt elért eredményekből 13 közlemény jelent meg.

## Műszerfejlesztések

Kutatásaimhoz a különböző rétegeket, multirétegeket a DE Szilárdtest Fizika Tanszékén épített magnetronos porlasztó berendezés segítségével állítottam elő, a rétegszerkezet mélységi feltárását szekunder neutrális tömegspektrométeres (SNMS) mérésekkel végeztem. A kutatási program szerves részét képezte az a műszerfejlesztés, mely eredményeként az SNMS berendezés mintamozgató egységének átépítése során megvalósítottuk a minták *in-situ* hőkezelési lehetőségét. A berendezés gyártójával egyeztetve a műszaki tervek átdolgozása után a teljes vákuumkamra, a mintatartó és mozgató rész, valamint a vezérlő elektronika egy részének cseréjét követően a fejlesztéssel sikerült egy

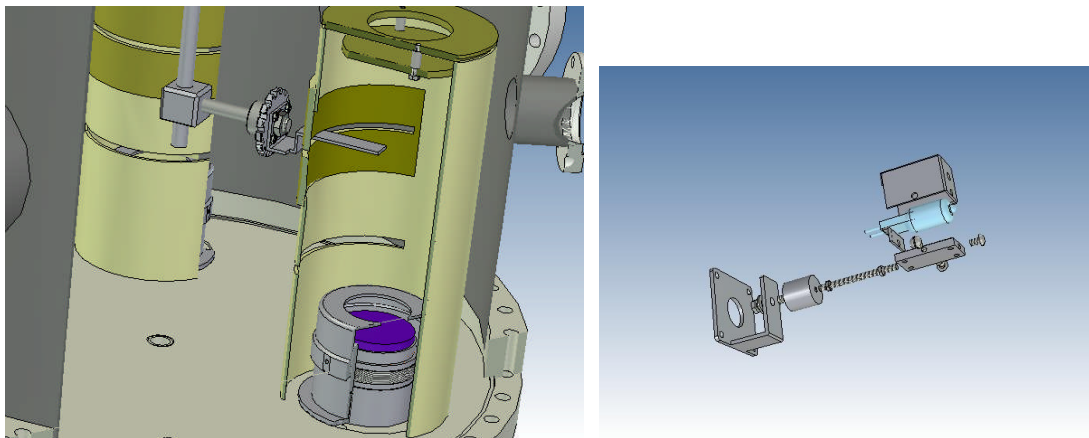


**1.ábra.** SIMS/SNMS berendezés átépített mintamozgató rendszere és az új fűthető mintatartó.

olyan mintatartó és mozgató rendszert kiépíteni (1. ábra.), mellyel a vizsgálandó minta a vákuumtérbe való elhelyezés után  $x$ ,  $y$  és  $z$  irányokban mozgatható, a mintatartó  $-150$  °C-tól  $600$  °C-ig hűthető-fűthető. Az  $x$ - $y$  síkban történő mozgatói lehetőségnek köszönhetően ugyanazon mintán több mérést is tudunk végezni a minta levegőre történő kivétele nélkül. A

méréstechnika roncsolásos jellege miatt korábban mérések után a mintát hőkezelés és/vagy átpozícionálás miatt levegőre ki kellett venni. Vékonyrétegek esetén, ahol a minta vastagsága a teljes mintafelülethez képest jelentősen kisebb, ez a réteg oxidálódását, felületi szennyeződések lerakódását eredményezhette. Az átalakításnak köszönhetően lehetővé vált a koncentráció mélységi eloszlásának (~1nm-es feloldással) a felület különböző pontjain történő felvétel az egymást követő hőkezelések után, a minta levegőre történő kivétele nélkül. Így elkerülhető a minta szennyeződése és oxidációja, a mélységi profil ismeretében pedig direkt információt nyerhetünk a diffúzió okozta változások nyomon követésére. Az átalakítás az eddig is használt röntgendiffrakció és transzmissziós mikroszkópiával kiegészítve további lehetőséget biztosít multirétegekben a határfelületek mozgásának a vizsgálatára, a munkatervben szereplő  $\text{Si}/\text{Si}_x\text{Sb}_{1-x}$  mintákban a határfelületek kialakulásának a nyomonkövetésére, valamint (a mintatartó mérés közbeni héliummal való hűtésének köszönhetően) az optoelektronikában igen széleskörűen használt kalkogenid multirétegek diffúziós vizsgálatának kiterjesztésére.

A munkatervnek megfelelően a  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Si}$  háromrétegű mintákban különböző antimon koncentrációk mellett a SiSb réteg szétesésének és az eredeti határfelületekkel párhuzamosan kialakuló határfelületek/koncentráció hullámok viselkedésének vizsgálata volt az elsődleges cél. Mivel az antimon oldékonysága az amorf Si-ban igen csekély (~0.1 %), ebből adódóan az SNMS mérések során kis mennyiségű beoldódott antimont kell kimutatni. Már a munka megkezdésének a legelején nyilvánvalóvá vált, hogy a minták készítése során nagy figyelmet kell fordítani a tiszta Si réteg antimonnal való szennyeződésének elkerülésére. Így első lépésként a Si és a SiSb forrásokat tartalmazó magnetronok „átszórásának” minimálisra való csökkentése érdekében a magnetronok körüli árnyékoló rendszer átalakítását



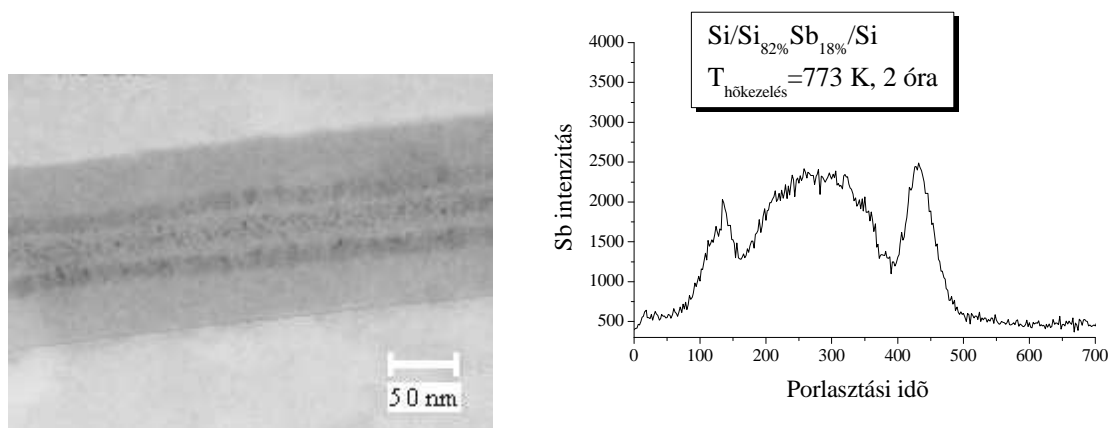
**2.ábra.** A porlasztóberendezés átépített zárt árnyékolórendszere és a hordozó fűtésére alkalmas mintatartó.

és a hordozó fűtésére alkalmas mintatartó kialakítását valósítottuk meg (2. ábra.).

A kutatási támogatás felhasználásával a berendezés bővítése céljából vásároltunk egy ultravákuum kivitelű léptetőmotor, a porlasztógáz beeresztésére alkalmas túszelepet és egy 0-500 W közötti porlasztási teljesítmény szabályzására alkalmas tápegységet.

### *Antimon diffúziójának vizsgálata Si/Si<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> rétegekben*

A kutatási munkatervnek megfelelően a Si/Si<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/Si háromrétegű struktúrákban a SiSb réteg szétesésének és az eredeti határfelületekkel párhuzamosan kialakuló határfelületek-koncentráció hullámok viselkedésének vizsgálata céljából x = 18 és 24 at% összetételű amorf mintákat készítettem magnetronos porlasztással Si egykristály hordozóra. A minták vákuumban (<10<sup>-7</sup> mbar) és 100 bar Ar gázban történt különböző idejű hőkezelése után az Sb



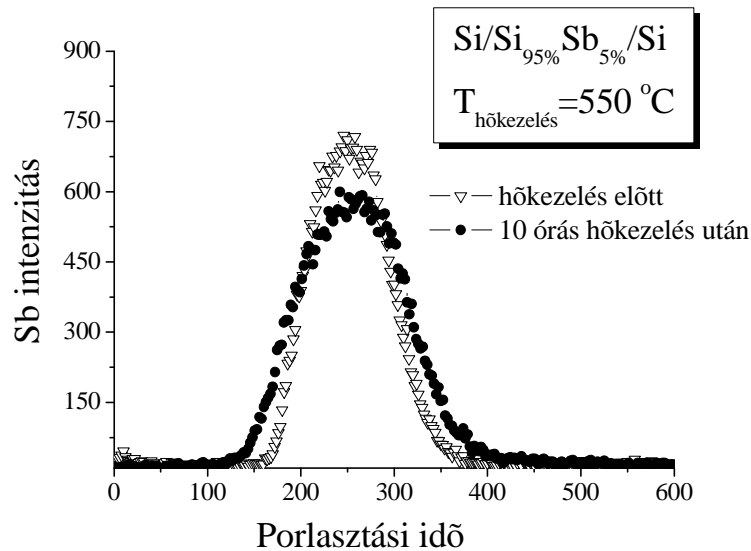
**3. ábra.** 18 at% Sb tartalmazó Si/Si<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/Si trirétegű minta transzmissziós mikroszkóp felvétele és SNMS mélységi profilja hőkezelés után.

mélységi koncentráció eloszlását szekunder neutrális tömegspektrométerrel (SNMS) követtem nyomon. Megállapítottuk, hogy a folyamat az antimonnak a határfelületeken történő szegregációjával kezdődik, majd nanokristályosodás után a középső antimont tartalmazó réteg szétesik és az eredeti határfelülettel párhuzamos koncentráció hullámok alakulnak ki (3. ábra.). A jelenséget, az eredetileg amorf SiSb réteg nanokristályossá válását követő felgyorsult diffúzióval és az Sb határfelületeken történő szegregációjával magyaráztuk. További hőkezelések során megfigyelhető volt az antimonnak a szabad Si felület felé történő diffúziója és ezáltal fogyása is.

Ellentétben a nyomás alatt hőkezelt mintákkal, vákuumban történt hőkezelések során koncentráció hullámok kialakulása nem volt megfigyelhető. Feltételezésünk szerint a hidrosztatikai nyomás alkalmazása elősegíti a kristályosodási folyamat beindulását és az így kialakult nanokristályos szerkezetben az effektív diffúziós együttható több nagyságrenddel nagyobb lehet. Az SNMS mérések eredményének megerősítésére egyes mintákat transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) is megvizsgáltam. A TEM felvételeket az SNMS vizsgálatok eredményeivel összevetve egyértelműen megerősítést nyert, hogy a mikroszkópos felvételeken már korábban is látott kontrasztkülönbségek antimon koncentráció hullámoknak felelnek meg. Az elért eredményeket a Portorozban megrendezett JVC-10 konferencián (10th Joint Vacuum Conference) mutattuk be, ahol az ELFT Vákuumfizikai Szakcsoport által meghirdetett legjobb magyar poszter díját nyertem el. Az eredményeket a *Vacuum* folyóiratban közöltük [1].

Az Sb amorf Si-ban történő diffúziójának további vizsgálatához, elkerülendő a SiSb réteg kristályosodását és szétesését, a 18 és 24 at%-os Sb koncentrációjú minták vizsgálata mellett 3-5 at%-os összetételű mintákat is készítettem. Feltételezve, hogy a jelentősen

alacsonyabb Sb összetétel mellett a rétegszerkezetben a koncentráció hullámok kialakulására nem lesz mód, a véges méretű antimonnal ötvözött tartomány „szétfolyásából”



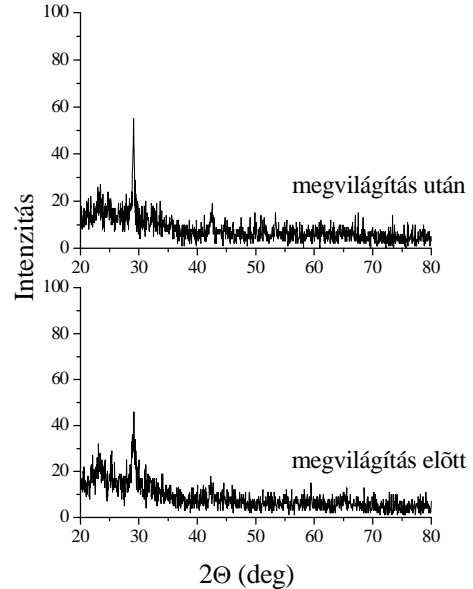
**4. ábra.** Sb koncentrációjának változása 550 °C-on történt 10 órás hőkezelés után.

meghatározható az Sb amorf szilíciumbeli diffúziós együtthatója. A hőkezeléseket 450–750°C hőmérsékleti tartományban (50°C-os lépésekben) végeztük vákuumban és 100 bar Ar nyomáson. A vákuumban hőkezelt mintákon, hasonlóan a magasabb összetételek esetében korábban végzett kísérleteinkhez, most sem tapasztaltunk észrevehető változást. A nyomáson hőkezelt minták esetében az SNMS koncentráció profilokban azonban az Sb csúcs kiszélesedése és lecsökkenése volt megfigyelhető. Az Sb koncentrációjának változását, 550°C-on történt 10 órás hőkezelés után a 4. ábra mutatja. Ellentétben a nagyobb összetételű mintákon mért eredményeinkkel a rendszernek spinodális bomláshoz hasonló transzformációja nem volt megfigyelhető a 10 órás hőkezelések után sem. Auger-elektronspektroszkópiával a minta felületén nem láttunk antimont, így feltételezhető, hogy az „elfolyt” anyagmennyiség a kétoldali Si rétegben van. A 600°C és 750°C hőmérsékleten hőkezelt minták transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatai már kristályosodást mutatott, mind a vákuumos, mind pedig a 100 bar-os hőkezelések esetén. Feltehetően az Sb jelenléte a Si kristályosodását eredményezi fém-indukált kristályosodási folyamat révén. A koncentráció eloszlás változásból, az Sb diffúziós együtthatójára az amorf Si-ban, 550 °C-on  $D_{Sb} \sim 1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$ -t kaptunk. Az eredmények poszter formájában az ICTF13/ACSIN8 (Stockholm) és Prágában a JVC-11 vákuumkonferenciákon mutattuk be, valamint a *Vacuum* és a *Defect and Diffusion Forum* folyóiratokban kerültek közlésre [2-3]. Meg kell jegyezni, hogy a [3] közleményből technikai okok miatt az OTKA nyilvántartási szám kimarad, de a cikk tartalmát tekintve látszik, hogy szorosan kapcsolódik a kutatási programhoz.

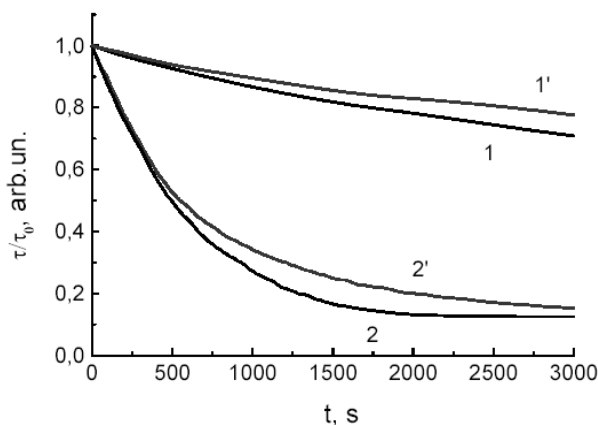
## Kalkogenid vékonyrétegek-multirétegek vizsgálata

A pályázata egy másik témaköre a kalkogenid anyagok vizsgálata volt. Az optikai adattárólok alapanyagaként használt kalkogenid rétegekben, noha igen széleskörben elterjedtek, a mai napig nem ismertek az olyan alapfolyamatok teljes bizonyossággal, mint a fázisátalakulások, fény indukálta kristályosodás és amorfizáció, diffúziós folyamatok.

A kutatási tervnek megfelelően e jelenségek vizsgálata céljából  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$  vékonyrétegeket és  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{SiO}_x$ , valamint  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{As}_2\text{S}_3$  multirétegeket készítettünk. A pályázat keretében a mintákban hőkezelés, valamint lézerrel történő megvilágítás hatására végbemenő kristályosodás röntgendiffrakciós és transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatát végeztem el. Mértük továbbá a megvilágított minták optikai és elektromos tulajdonságainak a változását is. Megállapítottuk, hogy a  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{SiO}_x$  multirétegekben, ellentétben a  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$  vékonyrétegekkel, már az előállítás után jelen vannak aprószemcsés krisztalitek (5. ábra.). Lézer fényel történő megvilágítás hatására szemcseméret növekedés figyelhető meg, mely jelentősen megváltoztatta a rétegek optikai tulajdonságait: a multiréteges minták optikai áteresztőképessége (a réteg sötétedése,  $\tau/\tau_0$ ) sokkal gyorsabban változott mint a vékonyrétegeké (6. ábra.). Adattárólo lemezek esetében e jelenség gyors írásra ad lehetőséget [4-7].



5. ábra.  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{SiO}_x$  multirétege röntgendiffrakciós spektruma megvilágítás előtt és után.



6. ábra.  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$  vékonyrétege (1, 1') és  $\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{SiO}_x$  multirétege (2, 2') optikai áteresztőképességének változása a megvilágítási idő függvényében.

közlemény és három konferencia anyag született.

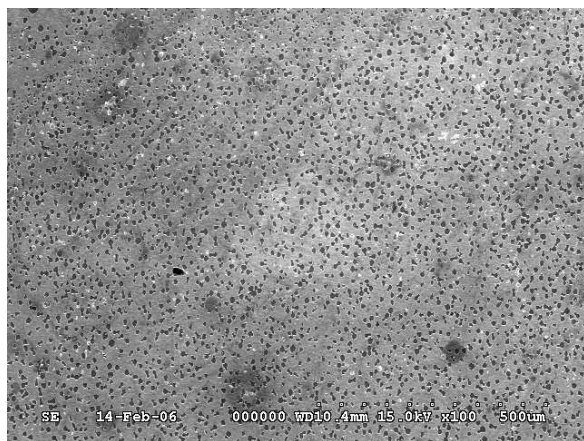
A termikus párologtatás és lézerablációval előállított  $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$  multiréteget vizsgálata során kiderült, hogy az utóbbi módszerrel előállított minták jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, a minták röntgendiffrakciós spektruma élesebb határfelülettel rendelkező szerkezetet mutat [8]. További mérések szükségeltetnek még az optikai paraméterek vastagságtól, modulációs hosszától való függésének vizsgálata, mely vizsgálatok jelenleg is folynak.

A kalkogenid anyagok vizsgálata során elért eredményeinkből 5 tudományos

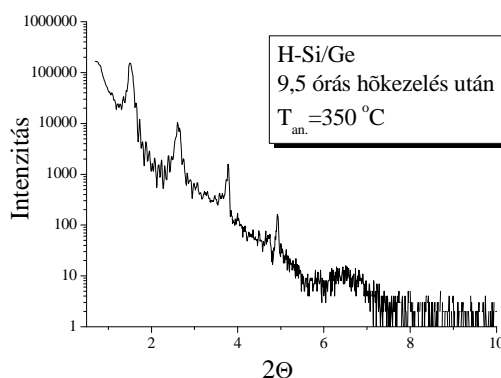
## ***Amorf Si/Ge és hidrogénezett Si/Ge multirétegek vizsgálata***

A munkatervnek megfelelően egy következő kutatási program az amorf Si/Ge multirétegek határfelületi élesedésének vizsgálata volt. Korábbi diszkrét modellszámolásaink a diffúziós együttható erős koncentráció függése esetén kristályos rétegekben azt a meglepő eredményt adták, hogy multirétegekben i) a diffúzió során a határfelület ellaposodás helyett éles marad és eltolódik; ii) ez az eltolódás a megszokottal ellentétben az időben lineáris függést mutat; iii) a kezdetben elmosott határfelületeket a diffúzió kiélesítette. Az első két állítást Ni film félvégtelen Cu mátrixba való beoldódásának Auger elektronspektroszkópos vizsgálatai igazolták, a határfelületek élesedését pedig szinkrotronnal végzett alacsony szögű röntgendiffrakciós mérések útján sikerült megmutatni Mo/V rendszerben. Ezen eredményekből kiindulva merült fel a kérdés, hogy amorf rendszerben is igazolható-e a kristályos multirétegeknél már bizonyított, kezdetben elmosott határfelület élesedése. A vizsgálatokhoz a Si/Ge mint modellt rendszert kívántam használni (korábban e rendszerben a diffúziós együttható koncentráció függését már vizsgáltam) és párhuzamosan hidrogénezett Si/Ge minták vizsgálatát is elkezdtük. Ez utóbbi rendszer azért vált érdekessé, mert az általunk készített Si/Ge multiréteg mindig tartalmaz oxigént (Si-nál ez gyakorlatilag elkerülhetetlen), ami beépülve a Si rétegbe 2 szabad gyököt/kötést hoz létre. A H-Si/Ge a hidrogén jelenléte miatt nyilván kevesebb oxigént fognak tartalmazni, szabad kötések száma is kevesebb lesz, így a diffúziós mechanizmus is más lehet. A H-Si/Ge mintákkal ezt a különbséget szeretnénk volna megvizsgálni.

A hidrogénezett minták hőkezelése 350, 400 és 450 °C történt. Az első méréseknél lehetőségünk volt szinkrotronnal vákuumkamrában *in-situ* kísérleteket végezni (BESSY), a további mérések Ar atmoszférában hőkezelt mintákon történtek *ex-situ*. Az elvégzett mérésekből egyértelműen kiderült, hogy a H-Si/Ge rendszer nem hidrogénezett mintákhoz képest sokkal érzékenyebb a hőkezelési hőmérsékletre. A Si/Ge multirétegnél diffúziós szempontból



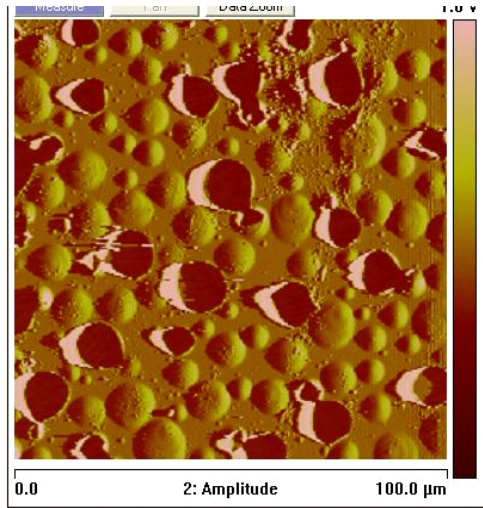
**7a. ábra.** 350 °C-on hőkezelt minta SEM felvétele



**7b. ábra.** 350 °C-on hőkezelt minta XRD spektruma

alacsonynak tekinthető 350 °C-os hőmérséklet a H-Si/Ge minták nagy mértékű degradációját eredményezi már 10 perces hőkezelés idő alatt, ami minden bizonnyal a hidrogénnek a rendszerből való távozásával hozható kapcsolatba. Az *in-situ* mérések után a minták eredeti sima felülete láthatóan feldurvult, így indokolt volt alapos mikroszkópos vizsgálatuk. A SEM felvételen látható (7a. ábra), hogy hőkezelés után a minta "tönkrement", de ugyanakkor van

kisszögű röntgendiffrakciós spektrum (7b. ábra), ami első ránézésre meglepő volt. Annak ellenére, hogy a felület teljesen felszakadozik az alacsonyszögű röntgendiffrakcióban nem tűnik olyan drasztikusnak a rétegszerkezet degradálódása. Ezért a diffúziós vizsgálatok további előrehaladása előtt a minta szerkezeti változásainak a feltérképezését volt indokolt

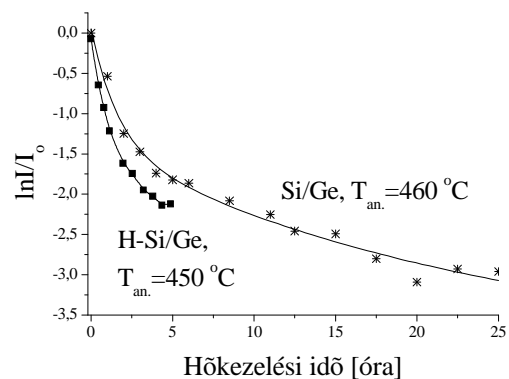


8. ábra.



9. ábra.

elvégezni. AFM és TEM vizsgálatok megmutatták (8-9. ábra.), hogy a rétegszerkezet a felület jelentős feldurvulása ellenére azokon a részeken ahol a réteg nem szakadozott fel megmaradt, ami magyarázza az alacsonyszögű spektrum meglétét. Az eddigiekből következően a további mérések célja azon hőmérséklet megtalálása volt, ahol a hidrogén távozása a rendszerből nem olyan gyors, hogy felszakítsa a réteget. A hőkezelések során minden lépés után a mintákról alacsonyszögű röntgendiffrakciós spektrum és SEM vizsgálat készült. A vizsgálatok eredményét összegezve azt mondhatjuk, hogy i) a felület feldurvulása már a hőkezelés első néhány percében megtörténik még a legalacsonyabb, 150 °C-on történt hőkezelések után is; ii) a további hőkezelések során a már jelentősen lecsökkent hidrogéntartalom melletti diffúziót „látjuk”; iii) az első mérési pont elhagyásával az alacsonyszögű röntgendiffrakció elsőrendű Bragg-reflexiós csúcsának időbeli változása ( $\ln I/I_0$ ) a Si/Ge és a H-Si/Ge minták esetén összehasonlíthatóak. Egy ilyen összehasonlítást láthatunk a 10. ábrán a hidrogénezett és a nem hidrogénezett minták elsőrendű Bragg-csúcsának időbeli változására. Látható, hogy a hidrogénezett mintában a Bragg-csúcs intenzitás csökkenése lényegesen rövidebb hőkezelési idők alatt megy végbe, ami arra utal, hogy a hidrogén jelenléte gyorsítja a diffúziós keveredést. A két rendszer diffúziós folyamatainak



10. ábra. Hidrogénezett és nem hidrogénezett minták elsőrendű Bragg-csúcsának időbeli változása.

pontosabb összehasonlításához azonban még további mérések elvégzése szükséges, melyek folyamatban vannak. Az eddigi eredményekből egy konferencia anyag készült el (DRIP XII, Berlin, 2007 Sept. 9-13) és egy közlemény megjelenése van folyamatban [9].

A H-Si/Ge minták vizsgálatával párhuzamosan az amorf Si/Ge határfelület elmozdulási kinetikájának vizsgálata céljából amorf Ge-ra felvitt néhány nm-es amorf Si réteg beoldódási kinetikáját vizsgáltuk AES-es *in-situ* Marseille-ben. A mérések tapasztalatai alapján XPS kinetika méréseket is végeztünk, mivel ezzel a módszerrel a Ge-jel változása sokkal pontosabban követhető. Az előzetes eredmények azt mutatják, hogy az élesen maradó határfelület eltolódása - szimulációs eredményeinkkel összhangban - nem követi a parabolikus törvényt [10].

A pályázat ideje alatt megjelent több összefoglaló tudományos közlemény is az eddig elért eredményeinkből vékonyrétegekben és multirétegekben zajló diffúziós folyamatok vizsgálatával kapcsolatban, a klasszikus diffúziós törvények (Fick-egyenletek) nanométeres tartományban való sérüléséről [11-15].

Debrecen, 2007. november 8.

.....  
**Dr. Beke Dezső**  
vezető kutató

.....  
**Dr. Csík Attila**  
témavezető

- [1] A. Csik, G. Erdélyi, G.A. Langer, L. Daroczi, D.L. Beke, J. Nyéki, Z. Erdélyi  
*Pattern formation in SiSb system*  
**Vacuum** 80 (2005) 168-173 (imp.:0.909)
- [2] A. Csik, G.A. Langer, G. Erdélyi, D.L. Beke, Z. Erdelyi, K. Vad  
*Investigation of Sb diffusion in amorphous silicon*  
**Vacuum** 82 (2008) 257-260 (imp.:0.909)
- [3] J. Nyéki, C. Girardeaux, Z. Erdélyi, A. Csik, L. Daroczi, G. Langer, D.L. Beke, A. Rolland, J. Bernardini, G. Erdélyi  
*Sb diffusion and segregation in amorphous Si thin films*  
**Defect and Diffusion Forum** 237 (2005)1246-1251 (imp.:0.483, 1 hivatkozás)
- [4] I. Ivan, D.L. Beke, S. Kokenyesi, I.A. Szabo, A. Csik  
*Light and ion induced interdiffusion in amorphous chalcogenide nanomultilayers*  
**Journal of Optoelectronics and Advanced Materials** 7 (2005)1831-1836  
(imp.:1.138; 2 hivatkozás)
- [5] M. Malyovanik, M. Shiplyak, V.M. Cheresnya, I. Iván, S. Kökényesi, A. Csik  
*Stimulated transformations in nano-layered composites with Se<sub>0.6</sub>Te<sub>0.4</sub>*  
**Journal of Optoelectronics and Advanced Materials** 7 (2005)1451-1456  
(imp.:1.138; 1 hivatkozás)
- [6] S. Kokenyesi, I. Ivan, A. Csik, I. A. Szabo, D. L. Beke



*Stimulated interdiffusion and optical recording in amorphous chalcogenide nanomultilayers*

**SPIE – The International Society for Optical Engineering**

Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics and Devices III

Proceedings of SPIE Vol. 6327 0 (2006)

- [7] S. Kokenyesi, M. Malyovanik, V. Cheresnya, M. Shiplyak, A. Csik  
*Stimulated structural transformations in  $Se_{0.6}Te_{0.4}/SiO_x$  nano-layered composite*  
**Journal of Non-Crystalline Solids** 352 (2006) 1529 (imp.:1.264)
- [8] V. Takats, P. Nemec, A. Csik, S. Kokenyesi  
*Photo- and thermally induced interdiffusion in  $Se/As_2S_3$  nanomultilayers prepared by pulsed laser deposition and thermal evaporation*  
**Journal of Physics and Chemistry of Solids** 68 (2007) 948-952 (imp.:1.410)
- [9] C. Frigeri, M. Serényi, A. Csik, Z. Erdélyi, D. L. Beke and L. Nasi  
*Structural modifications induced in hydrogenated amorphous Si/Ge multilayers by heat treatments*  
**Journal of Materials Science: Materials in Electronics** közlésre beküldve(2007)
- [10] Z. Balogh, Z. Erdélyi, D.L. Beke, G.A. Langer, A. Csik  
*Transition from anomalous kinetics towards Fickian diffusion for Si dissolution into amorphous Ge*  
**Physical Review Letters** közlésre beküldve(2007)
- [11] Z. Erdélyi, G.A. Langer, A. Csik, D.L. Beke  
*Nanoscale effects in interdiffusion*  
**Diffusion and Defect Data** 264 (2007) 91-98
- [12] Z. Erdélyi, D.L. Beke, G.A. Langer, A. Csik  
*Interface shape change and shift kinetics on the nanoscale*  
**Solid State Phenomena** 129 (2007)105-110 (imp.:0.493)
- [13] Kis-Varga M., Langer G.A., Csik A., Erdélyi Z., Beke D.L.  
*Effect of substrate temperature on the different diffuseness of subsequent interfaces in binary multilayers*  
**Defect and Diffusion Forum** közlésre elfogadva (2007) (imp.:0.483)
- [14] Z. Balogh, C. Cserháti, Z. Erdélyi, A. Csik, G.A. Langer, I. Zizak, N. Darowski, E. Dudzik, R. Feyerherm  
*Silicide formation reactions in a-Si/Co multilayered samples*  
**Defect and Diffusion Forum** közlésre elfogadva (2007) (imp.:0.483)
- [15] D.L. Beke, Z. Erdélyi, G.A. Langer, A. Csik, G.L. Katona  
*Diffusion on the nanometer scale*  
**Vacuum** 80 (2005) 87-91 (imp.:0.909)