

Projekt záró beszámoló

A munkatervben négy nagy csoportba soroltuk az elvégzendő feladatokat:

- I. Kölcsönös diffúzió, szilárdtest reakció és feszültségek
- II. Fázisnövekedés vizsgálata neutronos és szinkrotronos módszerekkel
- III. Fázisnukleáció rendezett rendszerekben korlátozott oldékonyság mellett.
- IV. Szemcsehatár diffúzió

Megvalósítás

Összességében elmondható, hogy a tervezett feladatokat maradéktalanul teljesítettük, sőt azon túlmenően is sikerült előrehaladást elérnünk.

I. Kölcsönös diffúzió, szilárdtest reakció és feszültségek

Ebben a részben azt vállaltuk, hogy modellt dolgozunk ki a szilárdtest reakció és feszültségek szerepének modellezésére sík és gömbi geometriában. Ezt meg is valósítottuk, kifejlesztettünk egy teljes leírást adó analitikus egyenletrendszert a gömbi, mag-héj típusú szerkezetekben lejátszódó reaktív diffúziós folyamatok leírására. A modell figyelembe veszi a rugalmas feszültségek kialakulását, azok képlékeny relaxációját, a lehetséges nem egyensúlyi vakancia eloszlásokat, a termodinamikai hajtóerőket az intermetallikus fázisok (IM) keletkezésének és növekedésének leírására. Megmutattuk, hogy a modell végtelen görbületi sugár esetében a sík geometriára vonatkozó esetben megy át. A közleményben a sík geometriára vonatkozó egyenleteket is megadtuk. Az eredményeket az Acta Materialia folyóiratban. Érdemes még megemlíteni, hogy az ADVANCES IN ENGINEERING internetes portál – mely mérnökök és kutatók (egyetemi, kutatóintézeti és ipari) részére nyújt információt az olyan témákról, mely őket potenciálisan érdekelheti – beválogatta ezt a közleményünket és címlapján ajánlotta. A vállalt feladatokon túlmenően, a modelt hengeres geometriára is továbbfejlesztettük. A kézirat jelenleg elbírálás alatt áll az Acta Materialia folyóiratban. A modellek így a ma divatos nanobogyókban, nanoszálakban és nanocsövekben lejátszódó reaktív diffúziós és feszültség felépülési, valamint relaxációs folyamatok modellezésére alkalmasak. Az eredményeket számos konferencián is bemutattuk meghívott előadások keretében is.

Noha eredendően kísérleteket nem terveztünk ebben a feladatcsoportban, lehetőségünk nyílt diffúzió és feszültségek közötti kapcsolat vizsgálatára kísérletileg is. Magnetronos porlasztással készített Cu/Ni multirétegeket hőkezeltünk és röntgen diffrakció segítségével követtük nyomon a keveredési folyamatokat, valamint az azokat kísérő feszültségváltozásokat. Az eredményeket a Phys. Rev. B folyóiratban tettük közzé.

Szintén nem terveztük hidrogén tartalmú Si/Ge rétegek termikus stabilitásának kísérleti vizsgálatát, azonban tematikailag beleilleszkedik a munkatervbe (kölsönös diffúzió, szerkezetváltozás, stb.), így egy együttműködés keretében ezek vizsgálatához is hozzájárultunk. Az eredményeket a Nano Reseach Letters, az Applied Surface Science és a Physics, Chemistry And Applications Of Nanostructures, Solar Energy és a CrystEngComm folyóiratokban közzétűtük le.

Továbbá Fém organikus kémiai gőzfázisú rétegleválasztási módszerrel Ge hordozóra növesztett InGaP rétegekben a hordozó/réteg határfelületek minőségét vizsgáltuk másodlagos semleges részecske tömegspektrometriás (SNMS) módszerrel. A mélységi eloszlás görbék félérték szélessége a határfelületeknél jól korrelációba volt hozható a minták felületén mért felületi durvasággal. Az elemek mélységeloszlását meghatározó görbéknek a felületi durvasággal, mint változó paraméterrel történő illesztésével a mért és a számolt görbék közötti különbségből kimutatható volt a Ge-nak a rétegbe történő diffúziója magasabb hordozó hőmérsékletek esetén. Az eredményeket a Electronic Materials and Processing (SSS&T) section of the ECS Journal of Solid State Science and Technology - ECS J. Solid State Sci. Technol. folyóiratban közzétűtük.

II. Fázisnövekedés vizsgálata neutronos és szinkrotronos módszerekkel

Ebben a részben azt vállaltuk, hogy fázisnövekedést vizsgálunk nanoskálán lejátszódó (reaktív) diffúziós folyamatokban. Ehhez különböző kísérleti módszereket terveztünk használni. A kísérletek támogatására a számítógépes modellezést is terveztünk.

A tervek szerint terveztünk neutron állóhullámos méréseket. A kísérletet meg is terveztük, véghezvittük a szükséges kísérleti fejlesztéseket. A Budapesti Neutron Központban (BNC) el is végeztük az előzetes méréseket. Majd ezt követően Dubnában végeztünk kísérleteket. Azonban sajnos a kísérletek eredményteleneknek bizonyultak. Majd pedig a sorozatos technikai nehézségek, a források hosszú időn át tartó üzemszünetei miatt e kísérleti technika feladására kényszerültünk. Mindezekről az éves részjelentésekben beszámoltunk. Ahogyan arról is, hogy azért, hogy ebben a feladatban vállalt vizsgálatokat teljesen ne lehetetlenüljenek el, a szinkrotron állóhullámos kísérletekre helyeztük át a hangsúlyt, valamint másodlagos neutrális rész tömegspektrometria (SNMS) és atompróba tomográfia (APT) segítségével végeztünk méréseket.

Szinkrotron módszereken alapuló vizsgálatokat Si/Ni/Si rendszerben végeztünk. Multirétegeken történő röntgendiffrakciós méréseket, valamint hullámvezető struktúrában (szinkrotron állóhullám) GIXRF és EXAFS méréseket folytattunk. Az eredmények kiértékeléséhez számítógépes programot is fejlesztenünk kellett. Az eredményeket az Acta Materialia folyóiratban tettük közzé. A Diffusion in Materials (DIMAT) konferencián, mely a szakterület legjelentősebb konferenciája (3 évenként kerül megrendezésre), Erdélyi Zoltán meghívott előadás keretében is beszámolt az eredményekről. Továbbá Erdélyi Zoltán felkérést kapott, hogy a Synchrotron: Design, Properties and Applications című könyvbe írjon egy fejezetet, mely azóta meg is jelent.

Cu/a-Si biréteges mintákban fázisnövekedési vizsgálatokat végeztük SNMS, XPS, XRD, 4 pontos ellenállás és APT módszerek segítségével. Eredményeinket az Acta Materialia és a Physica Status Solidi folyóiratokban tettük közzé.

Lehetőségünk adódott egy igen érdekes vizsgálat lefolytatására is. Ultra nagy gravitációs tér ($\sim 10^5g$) segítségével módosítani tudtuk egy multiréteg határfelületén a keveredési folyamatot. Az

ultracentrifugás kezeléseket, a szinkrotronos méréseket, majd a kiértékeléseket japán együttműködésben végeztük. Az eredmények a Phil. Mag. Lett. folyóiratban tettük közzé.

Kísérletileg vizsgáltuk, hogy egy intermetallikus fázis nukleációja és növekedése függ-e a szülő fázisok készítési sorrendjétől, azaz a rétegtrendtől. Cu/a-Si/Cu és a-Si/Cu/a-Si hármas rétegeken végzett másodlagos neutrális rész tömegspektrometria (SNMS) és atompróba tomográfia (APT) mérések segítségével megmutattuk, hogy a termék fázis nukleálódása, majd kezdeti növekedése nagyban függ a rétegtrendtől. Ugyanis a termék fázis nukleációját nagymértékben befolyásolja a szülő fázisokat elválasztó határfelület élessége, melyre viszont a rétegek elkészítésének sorrendje van jelentős hatással (dinamikus szegregáció). Az éles határfelület késlelteti az új fázis keletkezését és növekedését. A Cu-Si rendszerre vonatkozó termodinamikai adatokkal végzett számítások alapján polimorfikus nukleációs módként azonosítottuk be a nukleációs sémát. Eredményeinket az Acta Materialia folyóiratban tettük közzé. Az eredményeket a TMS konferencián is bemutattuk, melyből egy közlemény is született.

SNMS, TEM, FIB, szinkrotron és profilométer segítségével vizsgálatokat végeztünk Kirkendall effektus kimutatására nanoskálán a Cu-Ni, Pd-Fe, Sb-Bi és Fe-Sb vékonyréteg rendszerekben. A kutatásokhoz közel száz, néhány tíz nanométertől több száz nanométerig terjedő vastagságú, mintát készítettünk porlasztással. Kirkendall markerként ~ 1 nm W réteget alkalmaztunk. A méréseink alapján elmondható, hogy rendkívül nehéz a Kirkendall eltolódás megbízható megfigyelése nanoskálán. Az okokat elsősorban abban kell keresnünk, hogy a nanoléptékű eltolódások detektálását a minták hőkezelések közbeni szerkezetváltozása (szemcsenövekedés) és az alkalmazott mérési módszerek (mélységi profilanalízis) korlátozott feloldása megnehezíti. Az említett kísérleti problémák ellenére a Pd-Fe és Fe-Sb rétegtrendszerekben mértünk Kirkendall eltolódást, ugyanakkor a többi vizsgált mintán (Cu-Ni, Sb-Bi) megbízhatóan nem észleltünk effektust. A legérdekesebb kísérleti eredményünk, hogy a Fe-Sb rendszerben alkalmazott W-réteg, mint Kirkendall jel a hőkezelési folyamat során először kettéválik (duplázódik), majd pedig ismét egyesül. Ehhez hasonló jelenséget makroszkópikus mintában már figyeltek meg, de ezen a méretskálán ez az első ilyen észlelés. Az eredményeket publikálása folyamatban van, valamint májusban bemutatjuk a DIMAT2017 konferencián, mely – mint említettük – a szakterület legjelentősebb konferenciája.

A Kirkendall jelenség mélyebb megértéséhez, valamint a kísérleti eredmények értelmezéséhez számítógépes modellt is fejlesztettünk. Kidolgoztuk és beépítettük az programkódba a Kirkendall eltolódását és sebességét monitorozó algoritmust. Az eredmények azt mutatták, hogy a vakancia források/nyelők eloszlása jelentősen befolyásolja a nanoskálájú Kirkendall effektust és a kísérletekkel egyezően, Kirkendall jel szétválhat, szétszóródhat, vagy a szétszóródott inert részecskék egy sík mentén összegyűlhetnek. Az eredményeket a Thin Solid Films folyóiratban tettük közzé.

A Cu-Ni rendszerben az oldékonysági görbe mai napig vitatott. Leginkább egy számolt görbe használatos. Vizsgálataink alapján rámutattunk, hogy ennek a görbének a használata erősen kérdéses, mivel a szerzők meglehetősen önkényesen kiválasztott kísérleti indikációkra illesztették görbéjüket. Vékonyréteges kísérleti módszerre támaszkodva, SNMS segítségével kimértük az oldékonysági görbét. Az eredmények már elérhetők az arXiv.org -on és beküldésre kerültek a Scripta Materialia folyóiratba.

III. Fázisnukleáció rendezett rendszerekben korlátozott oldékonyság mellett.

Elsősorban kinetikus Monte Carlo (KMC) modellfejlesztést és számolásokat terveztünk, melyek során új fázisok nukleációit kívántuk vizsgálni különböző körülmények között.

Egy dimenziós kinetikus átlagtér modell (kinetic mean field – KMF) modellszámolásokat végeztünk rendeződő rendszerekben a határfelület eltolódási kinetikájának vizsgálatára, mely a KMC fejlesztés előfutára. Eredményeinket a Phil. Mag. Letters folyóiratban tettük közzé.

A munka során az eredeti tervek annyiban módosultak, hogy egyrészt kontinuum modellben végeztünk ilyen számolásokat, illetve nem az eddigi KMC modellt fejlesztettük tovább, hanem egy teljesen új modellt dolgoztunk ki. Az új modellt stochasztikus kinetikus átlagtér modellnek (stochastic kinetic mean field – SKMF) neveztük el.

Az egy dimenziós kinetikus átlagtérmodellt háromdimenzióssá alakítottuk és Langevin zajt építettünk bele. Ami azt jelenti, hogy az ugrási frekvenciák többé nem jól meghatározottak, hanem a zaj amplitúdójának a függvényében fluktuálnak. Ennek következménye, hogy a klasszikus KMC-hez nagyon hasonló eredmények érhetők el vele, azonban jóval kedvezőbb számolási idők mellett, továbbá az algoritmus programkódja is meglehetősen egyszerű (az skmf.eu oldalon nyílt forráskóddal elérhető). A zaj amplitúdójával a számolás stochasztikussága tetszőlegesen hangolható a determinisztikus és a stochasztikus között: nulla amplitúdójú zaj determinisztikus modellt eredményez, míg az amplitúdó növelésével, egyre stochasztikusabb lesz. Megmutattuk, hogy egy adott amplitúdóhoz megfeleltethető egy szám, ahányszor a KMC algoritmust lefuttatva és az eredményeket átlagolva ugyanazt az eredményt kapjuk, mint egy SKMF futtatásával. Az SKMF egy új típusú kinetikus Monte Carlo technikaként is felfogható. Az eredményeket a Computer Physics Communications folyóiratban tettük közzé.

Kidolgoztuk, hogy a kontinuum modellbe (mely az I-ben használt modell egy variánsa) hogyan tehető be vonalfázis, tetszőleges sztöchiometria mellett. Ehhez az eredeti termodinamikai koncepciót is módosítottuk koncentráció alapúról kémiai potenciál alapúra. Majd pedig a fázishatárokon feltételezett extra aktivációs gát modellezésére bevezettünk egy paramétert, mely a fázishatárokon keresztüli diffúzió gyorsaságát szabályozza. Ezzel el tudtuk érni, hogy egy (vagy több) fázis a termodinamikai feltételeknek megfelelően, magától nukleálódjon (nem szükséges a létezésüket előre feltételezni és egy vékony fázist betenni kezdetben a modellszámolások során, mint eddig) és a növekedése kezdetben lineáris legyen, majd pedig fokozatosan átmenjen a parabolikusba. Ilyen módon a jól ismert fenomenologikus lineáris-parabolikus átmenetet sikerült modelleznünk. Az eredményeket a Computational Materials Science folyóiratba küldtük be, jelenleg a bírálók/editor által két változtatásokon dolgozunk. Reményeink szerint hamarosan elfogadásra kerül a kézirat.

Nukleációs folyamatokat tisztán fázisszeparálódó rendszerben is vizsgáltunk. Mégpedig Cu-Ag nanorészecskékben lejátszódó szétesési folyamatokat követtük nyomon nagyfeloldású transzmissziós elektronmikroszkópia (HREM) segítségével. A nanorészecskéket DC magnetronos porlasztással növesztettük szén hordozóra, szobahőmérsékleten. Azt találtuk az 5 nm átmérőnél kisebb részecskék mind szilárdoldatként (egyfázisú részecske) növekedtek minden összetétel (15-80 Ag at%) esetében. Azonban a 15 és 30 Ag at% összetételű részecskék közül az 5 nm-nél nagyobbak már szétesetek Cu-ben, illetve Ag-ben gazdag tartományokra (kétfázisú részecskék), azonban a 60-80 Ag at% összetételű részek még ekkor is egyfázisúak maradtak. Az 15 és 30 Ag at% összetételű részecskék azonban, ha összenőttek, és így már volt 5 nm-nél nagyobb méretük valamilyen irányban akkor, szintén szétesetek

két fázisra. A 60-80 Ag at% összetételű részek is szétestek, ha összenőttek és legalább 10 nm-t elérte valamilyen irányú méretük. A szétesés spinodális bomlással ment végbe. Mint látható, a spinodális bomlás méret- és összetételfüggő is a kísérleti megfigyelések alapján. Mindezt a Cahn-Hilliard modellre támaszkodó analitikus számolásokkal sikerült is alátámasztanunk, ráadásul a kapott kritikus hullámhosszak, a hullámhossz koncentrációfüggése igen jól egyezik a kísérleti értékekkel. Az eredményeket az Acta Materiali folyóiratban tettük közzé.

IV. Szemcsehatár diffúzió

Ebben a részben szemcsehatár diffúziós méréseket terveztünk. Itt egyrészt ALD-vel készült rétegekben is terveztünk méréseket. A pályázatban azokat a vizsgálatokat, melyekhez ALD szükséges, nagy kockázatúnak írtuk már a pályázati anyagban is, hiszen egy teljesen új technika meghonosítását vállaltuk.

A terveknek megfelelően Cu/Ni mintákat készítettünk a Hwang-Balluffi kísérletekhez magnetronos porlasztás segítségével. Elvégeztük az ígért, előzetes kísérleteket az XPS-SNMS berendezéssel. Sőt, ezen túlmenően LEISS technikát is alkalmaztunk, így gyakorlatilag két független módszer segítségével tudjuk nyomon követni a Cu felületi akkumulációs kinetikáját. A kísérletek sikeres elvégzéséhez több nehézséggel is meg kellett birkóznunk. Egyrészt meg kellett oldanunk az in-situ hőmérsékletmérés problémáját az XPS-LEISS kamrában, másrészt ki kellett dolgoznunk az optimális XPS-LEISS mérési eljárást. Továbbá, a LEISS eredmények kiértékelése sem volt rutinmunka, minthogy Ni és Cu nem a legideálisabb elem-pár ebből a szempontból. Az eredményeket az ICTF konferencián mutattuk be, az eredmények folyóiratban történő publikálására várhatóan hamarosan sor kerül.

Au/Cu, Ni/Si, Pd/Cu, Ag/Au és Ag/Pd rendszerekben alacsony hőmérsékleten lejátszódó diffúzió indukálta szilárdtest reakciót vizsgáltunk. A II. pontban leírt vizsgálatokhoz képest a különbség az, hogy az alacsony hőmérséklet következtében a szemcsehatárok szerepe domináns lesz. A keveredés nem a térfogatban, a két anyag határfelületénél indul meg, hanem a szemcsehatárokból. Majd a szemcsehatárokból indul meg a fázisnövekedés. Ennek a folyamatnak a leírására egy modellt dolgoztunk ki. A szemcsehatárból kiindulva növekvő fázisok határának mozgási sebességét, valamint összetételüket is meghatároztuk. Az eredményeket a Beilstein J. Nanotechnology, az Applied Surface Science és a Materials Research Express folyóiratokban tettük közzé.

Alacsony és magas hőmérsékletű vizsgálatokat végeztünk Fe/Ag/Pt rendszerben. Megállapítottuk, hogy a Fe/Ag/Pt tri-rétegben először az Ag és Pt rétegek keverednek, létrehozva egy $Ag_x Pt_{1-x}$ réteget, majd ezt követően a Pt elhagyja az Ag-Pt tartományt és a vassal FePt réteget alkotnak. Eközben az Ag az eredeti Pt réteg helyén jelenik meg és alkot egy réteget. A folyamatot mind alacsony, mind magas hőmérsékleten megfigyeltük. Alacsony hőmérsékleten a jelenséget diffúzió indukálta szemcsehatár mozgással és szilárdtest reakcióval magyaráztuk, az eredményeket a J. Phys. D: Appl. Phys. folyóiratban publikáltuk. Hasonló vizsgálatokat végeztünk Fe/Au/Pt rendszerben is, azonban ebben az esetben az Au a Fe réteg irányába (helyére) mozdult el, amit azzal magyaráztunk, hogy a Fe jelentősen gyorsabban diffundál az Au szemcsehatárokon, mint a Pt. Az eredményeket szintén a J. Phys. D: Appl. Phys. folyóiratban publikáltuk. Mindkét rendszerben a keletkező FePt fázis részleges rendezettségét is megfigyeltük.

A $Pt/^{56}Fe/^{57}Fe$ rendszerben alacsony hőmérsékleten vizsgáltuk a diffúziós folyamatokat. A folyamat kinetikájának elemzése során megállapítottuk, hogy a folyamatot kezdetben a szemcsehatár diffúzió dominálja, majd hosszú hőkezelési időknél a térfogati diffúzió lesz a meghatározó. A kettő közötti

átmeneti tartományban, amikor a szemcsehatárok már telítődtek, de a térfogati keveredés még elhanyagolható, a diffúziós keveredés látszólag leáll. Ezt modellszámolásokkal is igazoltuk. Az eredményeket a Thin Solid Films folyóiratban közzétettük.

Az I., II. és a IV. feladatot is érintően vizsgáltuk a hordozó szerepét a rendeződésre Fe/Pt és Fe/Ag/Pt filmekben. A MgO(001), SrTiO₃(001) és Al₂O₃(0001) hordozókra leválasztott mintákat magas hőmérsékleten rövid ideig (30 s) hőkezeltük N₂ atmoszférában. Az eredményeket a hordozók és a réteg eltérő hőtágulása miatt megjelenő feszültségekkel magyaráztuk. Az eredményeket a J. Appl. Phys. folyóiratban közzétettük.

Ismeretes, hogy az ALD-vel készített rétegekben tűszerű folytonossági hibák keletkezhetnek (pin-hole), melyek diffúziós rövidzárként viselkednek – a szemcsehatárokhoz teljesen hasonlóan. Ezekben „szemcsehatárokon” keresztüli diffúzió vizsgálatának céljából, Si hordozóra Cu vékonyréteget készítettünk, majd annak felületére ALD segítségével Al₂O₃ réteget vittünk fel. A mintákat hőkezeltük és AES segítségével követtük nyomon a Cu szabadfelületre jutását és bedúsulását. A vizsgálatokra egy új együttműködést létesítettünk az MTA EK MFA-val. Kiderült, hogy már a Si/Al₂O₃ rendszer is meglepő viselkedést mutat, nem azt, mint vártuk. Az előzetes eredményeket már több konferencián is bemutattuk, mely megerősített bennünket abban, hogy a megfigyelt eredmények valóban szokatlanok és újak. Az eredményeket összefoglaló kézirat lényegében elkészült, hamarosan beküldésre kerül. Már látható, hogy ez csak a kezdet, vizsgálatok és közlemények sorozata várható ezen a területen.

A pályázatban azt ígértük, hogy ha az eredetileg tervezett ALD-s kísérletek sikertelenek, akkor egyéb jelentős témát állítunk be a helyükre, természetesen ALD-re alapozva. Minthogy nem a tervezetteknek megfelelő ütemben haladtak eleinte a mérések, bővítettük aktivitásunkat ezen a területen.

Az egyik ilyen új téma ezen a területen a pórusos arany nanorészecskék morfológiájának és optikai (plazmonikai) tulajdonságainak módosítása felületi passziválással és hőkezeléssel. Pórusos arany nanorészecskéket készítettünk, melyek átmérőjét 50-500 nm tartományba változtattuk. A pórusok mérete tipikusan 20 nm, de ez is változtatható. Mint ismeretes az alkalmazások széles köre a fém nanorészecskék felületi plazmonrezonancia jelenségén alapszik. Az arany az egyik klasszikus és legkedveltebb anyag. Mint megmutatták, pórusos részecskék még kedvezőbbek, mint a tömör részecskék. A felületi plazmon rezonancia széles tartományban változtatható a részecske, illetve a pórusok méretének változtatásával (jóllehet az összefüggés sokszor nem igazán világos). Ráadásul a rezonancia frekvenciát a részecskék környezete is befolyásolja. Így az ilyen szerkezetek pl. a szenzorikában igen nagy potenciállal bírnak. Azonban az alkalmazást nagymértékben gátolja, hogy a pórusos nanobogyók nagyon instabilak, a pórusok már alacsony hőmérsékleten is „begyógyulnak”, megváltozik az alakjuk (pl. 160 °C-on 30 perc alatt). Ennek meggátlására a pórusos bogyókat bevontuk Al₂O₃-mal 5 nm vastagságban (a pórusokon belül is, ezt FIB és TEM mérések is igazolták). Ennek eredményeképpen a pórusos arany nanorészecskék egészen 900-1000 °C-ig stabilak maradtak és a felületi plazmon rezonancia frekvenciájuk sem tolódott el. Eredményeinket az Acta Materialia folyóiratban tettük közzé. Ráadásul új izraeli és német együttműködések alakítottunk ki.

A téma folytatásaként szisztematikusan vizsgáltuk, hogy az optikai tulajdonságok hogyan változnak a nanorészecske és a pórusok méretének, valamint a környezet törésmutatójának (ALD bevonat) a

függvényében. Az eredményeket összefoglaló az ACS Applied Materials & Interfaces folyóiratban van elbírálás alatt, visszaküldtük a bírálói/editori észrevételekre adandó válaszainkat.

A másik téma, ami elindult, az szén-TiO₂ kompozit és üreges TiO₂ nanogömbök létrehozása ALD segítségével és fotokatalitikus tulajdonságainak vizsgálata. Első eredményeink a JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES-ben jelentek meg, de hamarosan további közlemények megjelenése várható. Ennek keretében is újabb együttműködést alakítottunk ki, a BME Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszékével.

További említésre méltó eredmények

Parditka Bence elkészítette és sikeresen megvédte PhD értekezését, mely nagymértékben a jelen projekt eredményeire támaszkodik.

Elnyertünk egy FP7-es pályázatot, melybe a jelen projekt támogatásával elért eredményeinknek is köszönhetően hívtak meg bennünket.

Erdélyi Zoltán munkáját 2014-ben Selényi Pál díjjal jutalmazták.

Csatlakoztunk a Hooking together European research in atomic layer deposition (HERALD) COST projekthez.

Erdélyi Zoltán sikeresen megvédte MTA doktori értekezését

Csoportunk egy nemrég elnyert GINOP pályázatban is résztvevő lett a jelen pályázatból született eredményeknek jelentős mértékben köszönhetően.