



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

**ELEKTRONIKAI KÖTÉSI HATÁRFELÜLETEK MINŐSÍTÉSE
ATOMERŐ-MIKROSZKÓPOS KÉPALKOTÁSSAL ÉS -ELEMZÉSSEL**

Tézisfüzet

Molnár László Milán

Témavezető: Dr. Harsányi Gábor egyetemi tanár

B U D A P E S T

2 0 1 2

A kutatás előzménye

Az elektronikai gyártásnak két kihívással kell folyamatosan szembenéznie: az egyik a miniaturizálás, a másik a megbízhatóság követelménye. Az elektronikus alkatrészek méretcsökkenése gyárthatósági problémákat vet fel. Ismert példa az integrált áramkörök (IC: integrated circuit) komplexitását leíró Moore-törvénynek nevezett megfigyelés, amelyet számos formában megfogalmazhatunk, de mindegyiknek az az üzenete, hogy az aktuális legmodernebb tömegtermelésű IC áramkör bonyolultsága exponenciálisan növekszik, és ez a trend három évtizede változatlan. Az áramköri bonyolultság növekedésének egyenes következménye, hogy az integrált áramkörök kivezetéseinek, valamint az áramköri hordozón lévő kötési felületeknek a mérete is csökken.

A méretcsökkenéssel együtt jár az, hogy újabb vizsgálati módszereket kell meghonosítanunk az elektronikai technológia eszköztárában. Az elmúlt évtizedek folyamán a különböző mikroszkópok közül az egyre nagyobb felbontást biztosító készülékek elterjedése megfigyelhető. A szabad szemmel történő vizsgálat után megjelentek az optikai mikroszkópok, később a pásztázó elektronmikroszkópok.

Az elektronikai gyártástechnológia rendkívül szerteágazó: számos áramköri hordozó- és alkatrész típus létezik, melyek közül az értekezésemben a nyomtatott huzalozású lemezek felületszerelési technológiájának és a kerámia hordozós hibrid áramkörök gyártásának egy-egy lépése kerül bemutatásra. A nyomtatott huzalozású lemezek és a rajta lévő diszkrét alkatrészek tipikus kötéstechnológiája az újraömlésztéses forrasztás, amely a forrasztóanyag megolvasztása majd megszilárdulása által tölti be elektromos vezető és mechanikai rögzítő szerepét. A forrasztóolvadéka és a forrasztási felület között diffúziós és oldódási folyamatok során intermetallikus vegyületek képződnek a részt vevő anyagok fázisdiagramja szerint. Dolgozatomban a SAC (Sn96.5Ag3.0Cu0.5) összetételű forrasztó és az immerziós ón bevonattal ellátott réz forrasztási felület közötti határfelületen képződő IMC tulajdonságait vizsgáltam lézeres forrasztás közben. A téma jelentőségét az adja, hogy az Sn-Cu rendszerben az intermetallikus vegyület mechanikai tulajdonságai kedvezőtlenek a forrasztás mechanikai stabilitása szempontjából, ezért túlzott képződése nem kívánatos.

A másik vizsgált kontaktusfelület a hibrid áramköri technológiában használt ultrahangosan köthető vastagréteg, azon belül az ezüst-palládium ötvözetet tartalmazó, üveg kötőanyagú fajta. A vastagrétegek huzalkötése meglehetősen

érzékeny a felületi tulajdonságokra (összetétel, szennyeződések, felületgeometriai paraméterek), szélsőséges esetben a huzalkötés meghiúsulhat, amennyiben a felület nem megfelelően van előkészítve.

A kutatás motivációja, célkitűzései

A kutatásom során azt a célt tűztem ki, hogy a pásztázószondás mikroszkópok és azon belül is az atomerő-mikroszkópok (AFM) felhasználási lehetőségeit keressem meg az elektronikai mikrokötések szerkezetvizsgálatának területén. Az elektronikai mikrokötések rendkívüli sokfélesége miatt ezt az általános célt leszűkítettem olyan speciális kötési technológiákra és anyagi rendszerekre, amelyek anyagtudományi jelenségeit napjainkban aktívan kutatják.

Így esett a választás elsőként a hibrid áramkörök vastagréteg-technológiával gyártott vezetőpályáinak felületi vizsgálataira. Ezeket a vastagrétegeket az integrált áramköri szint felé tipikusan $d=25\ \mu\text{m}$ átmérőjű huzallal, míg a teljes tokozott áramkör kivezető lábait is ultrahangos huzalkötéssel kötik össze, $d=200\ \mu\text{m}$ átmérőjű huzallal. Az ultrahangos huzalkötés erőssége a vastagréteg és a huzal felületének számos tulajdonságától függ, melyen belül speciális helyet foglalnak el a különböző szennyeződések. A felületek minősítése tehát kiemelten fontos a huzalkötés előtt, amely célra az AFM egy lehetséges eszköz.

A második tématerületként a forrasztás során a forrasztás és a réz forrasztási felület között kialakuló fémek közötti - idegen szóval intermetallikus - vegyületeinek (IMC: intermetallic compound) vizsgálatával foglalkoztam. Az intermetallikusok szerkezetének elemzésére elterjedt eljárások egy része csupán a réteg átlagos vastagságot, másik része kvalitatív összehasonlítást tesz általában pásztázó elektronmikroszkópos képek alapján. A forrasztással foglalkozó irodalom egyetért abban, hogy szükség van az intermetallikusok háromdimenziós elemzésére, melyre nincs rutinszerűen alkalmazott eszköz, illetve a bevett eljárások felületre merőleges irányban pontatlanok. Célul tűztem ki, hogy atomerő-mikroszkópiára alapozott mérési módszert találjak a szemcsés IMC-k háromdimenziós elemzésére.

A kötési felületek vizsgálatakor felmerült az atomerő mikroszkópia egy adatkiértékelési problémája. A huzalkötések alatti vastagrétegek és a forrasztási

határfelületeken kialakuló intermetallikus vegyületek szemcseméretének tipikus nagyságrendje 1 μm , ezért az AFM tipikus működési tartományának határait feszegetjük, és a leginformatívabb pásztázási méretekből (pl. $10 \times 10 \mu\text{m}^2$) a pásztázott terület függőleges és vízszintes irányú kiterjedésének aránya akár 1:10, vagy nagyobb is lehet. Ebből a szempontból az ilyen felületek vizsgálata nem tipikus AFM-es alkalmazás, és a gyakorlatban elterjedt képszűrési- és szintezési eljárások ebben a tartományban számottevő relatív mérési hibát okoznak. Célul tűztem ki tehát, hogy az ilyen, nagy magasság-szélesség arányú minták esetére alkalmazható AFM képszűrési algoritmust dolgozzak ki.

Kutatási előzmények a BME Elektronikai Technológia Tanszékén

Értekezésemben bemutatott elemzési módszerek és atomerő-mikroszkópos vizsgálatok szervesen illeszkednek a munkámnak helyet adó BME Elektronikai Technológia Tanszékének profiljába. A hibrid áramköri technológia és a nyomtatott huzalozású lemezek gyártása és szerelése a Tanszéken több évtizedes múltra tekint vissza. A hagyományosnak tekinthető forrasztási módszerek (pl. hullámforrasztás) mellett a Tanszék infrastruktúrája lehetővé teszi egyéb, különlegesebb technológiák alkalmazását is: ilyen a lézeres vagy a gőzfázisú forrasztás.

A Tanszéken született publikációk közül a munkámat is megalapozó, és témájában illeszkedő előzményeket találhatunk meg. Lézeres forrasztás témakörében Dr. Gordon Péter és közvetlen munkatársai végeznek kutatásokat, amelyeknek egy jelentős része a lézer-anyag kölcsönhatás termikus folyamatainak elemzésére és ezek szimulációjára terjed ki [1,2]. A lézeres forrasztás hőközlése a hagyományos forrasztási technológiáktól alapjaiban tér el, ezért a forraszolvadék és a szilárd forrasztási felület határrétegében lejátszódó fizikai-kémiai folyamatokat más vezérlő egyenletek írják le. Az olvadákfém és a szilárd fém közötti intermetallikus rétegek morfológiai és mechanikai tulajdonságainak vizsgálatára az utóbbi néhány évben több PhD témakiírás született. Hurtony Tamás doktori munkájában pásztázó elektronmikroszkópos és egyéb metallográfiai módszerekkel elemzi ezeket a vegyületeket, elsősorban lézeres forrasztással előkészített forrasztásokon [3].

Az értekezésben kimondott új tudományos eredmények

- I. **téziscsoport:** Atomerő-mikroszkópos mérési eljárást dolgoztam ki az ultrahangos huzalkötések megbízhatóságának felületi minőség alapján történő minősítésére.
 - a. Elsőként alkalmaztam kontakt és kopogtató üzemmódú atomerő-mikroszkópiát huzalkötési felületek vizsgálatára, mely alapján egyértelműen eldönthető egy felületről, hogy huzalkötés szempontjából megfelelő-e vagy sem. Az atomerő-mikroszkópos mérésekkel bizonyítottam, hogy a gyártás közben tapasztalható huzalfelválásokért felületi adszorbeált szennyeződés felelős, amelynek jelenléte az atmoszférából származó víz kondenzációjával is együtt jár. A jelenséget kontakt és kopogtató üzemmódú magasság-térkép, fázistérkép és eltérésjel-térkép segítségével igazoltam, valamint kizártam annak lehetőségét, hogy a szennyeződésként azonosított foltok szabályozási műtermékek.
 - b. Megmutattam, hogy az I.a. tézispontból származó eredmények felhasználhatók az AgPd vastagréteg huzalkötési felületek minősítésére, és szintén az AFM mérésekből származó adatok alapján javaslatot tettem a megfelelő tisztítási eljárásra. A huzalkötés szempontjából a $T=150\text{ °C}$, $t=10\text{ min}$ paraméterű hőkezelés jelentősen csökkentette a felváló kötések számát és növelte a szakítóerő értékét.

A fém szemcséken található képhiba információtartalmát meghatároztam: a minta és a tű közötti mechanikai kölcsönhatás erőssége utal a szennyeződés jelenlétére, így ennek struktúrájából lokálisan, kvalitatív módon képet kaphatunk a minta felületén található anyagbeli inhomogenitásáról. Korrelációt állítottam fel a huzalkötés erősségére jellemző szakítóerő-érték és a képeken látható, szennyeződésként azonosított foltok jelenléte között.

Publikációk: [L1], [K1]

II. tézis: A forrasztás közben kialakuló Cu-Sn intermetallikusok háromdimenziós szerkezetének vizsgálatára alkalmas atomerő-mikroszkópos mérési eljárást dolgoztam ki, ami lehetővé teszi forrasztás alatti IMC-k szemcsézettségének mérését, és a szemcseméret-eloszlás háromdimenziós statisztikai elemzését.

A forrasztás elektrokémiai marással elvégzett szelektív eltávolítása után lehetőség nyílik az IMC közvetlen mérésére. Az intermetallikusok háromdimenziós jellemzéséhez a forrasztás alatti szerkezetről a forrasztás felől, felülnézetből készítek atomerő-mikroszkópos képet. A réteg felső, boltozatos vagy kúpszerűen szemcsés tartományát az atomerő-mikroszkópos képekből kiindulva a szemcse térfogatának eloszlását határozom meg. A kiértékelés csak nagy nehézségek árán automatizálható, ezért az alábbi lépéseket végzem el:

1. A magasság-térképeken a szemcséket középen megjelölöm.
2. A jelölés dilatációjával addig növelem a jelölés méretét, amíg a szomszédos szemcsék jelölésével össze nem ér. Ekkor a szemcsejelölés határai jó közelítéssel a szemcsehatárral esnek egybe.
3. A teljes szemcsére kiterjedő jelölés alatti magasság-értékeket a legalacsonyabb értékhez viszonyítva összeadom, így az IMC tömör rétege feletti szemcsetérfogatot kapom eredményül.
4. A teljes felületet a 3. pontban kapott térfogat-értékek hisztogramjával jellemzem.

A keresztcsiszolati rétegvastagság-mérés az általam definiált módszer eredményével kiegészítve teljes geometriai jellemzését adja az intermetallikus rétegeknek.

Publikációk: [L3], [K2]

III. tézis: Új AFM adatkiértékelési módszert dolgoztam ki, amely alkalmas nagy magasság-szélesség arányú felületi egyenetlenségeket tartalmazó minták automatikus szintezésére és bizonyos atomerő-mikroszkópiára jellemző műtermékek kiszűrésére.

Az eljárás a felületi mintázatra jellemző, ún. szerkezeti entrópia elemzésén alapul. Előnye az elterjedt szűrési módszerekhez képest az, hogy a kép műtermékeit felhasználói közbeavatkozás nélkül felismeri, meghatározza a műtermékre jellemző korrekciós függvényt, mellyel lehetővé válik a korrigált kép előállítása.

A nagy magasság-szélesség arányú minták esetében az atomerő-mikroszkóp adatainak bevett szűrési algoritmusai nem vezetnek kielégítő eredményre. A megfelelő szűréshez olyan mérőszámot kell megadni, amely jellemző a felület lokális szerkezetére. Ha olyan mintával rendelkezünk, amelynél feltételezhető, hogy a felületen számottevően nem változik pl. a szemcsék alakja, akkor ez a paraméter a következő gondolatmenettel használható képszűrésre:

1. Meghatározzuk a szemcsék alakjára jellemző mérőszám értékét,
2. A képmező teljes felületén vizsgáló ablakokat kijelölve lokálisan is kiszámoljuk ezt az értéket. Ha a mintán szűrendő háttér van, akkor ez az érték az elvárásunktól eltérően inhomogén lesz.
3. A szerkezeti mérőszám inhomogenitásait próbafüggvényekkel minimalizáljuk.

A szerkezeti mérőszámnak a képfeldolgozásban és molekuladinamikai számításokban használt szerkezeti entrópiát választottam. A szűrési eljárás működőképességét meghatározott geometriával rendelkező kaliberen demonstráltam.

Publikációk: [L2], [L4], [L5]

Az eredmények hasznosulása

Az I. téziscsoport eredményeként az értekezésemben megadott paraméterekkel deifinált tisztító hőkezelés egy autoelektronikai termék gyártástechnológiai sorába bekerült, és a Robert Bosch Elektronika Kft. hatvani telephelyén jelenleg is alkalmazzák AgPd vastagrétegek köthetőségének javítására.

A II. tézis eredménye felhasználható a lézeres forrasztás során képződő intermetallikus réteg tulajdonságainak meghatározására, ami által megadható az optimális forrasztási időtartam.

A III. tézis eredményeit felhasználva jelenleg is fejlesztés alatt van egy AFM képek automatikus szűrését kivitelező szoftver fejlesztése. A szerkezeti entrópia mint mérőszám alkalmazhatósági lehetőségeit folyamatosan vizsgálom több kollégámmal együtt, melyek közül a legkevesetétöbb az elektrokémiai elektródafelületek minősítése lehet.

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L1] **László Milán Molnár**, Szabolcs Dávid, Gábor Harsányi: Qualification of AgPd Thick Films Using Atomic Force Microscopy. MICRO AND NANOSYSTEMS 2:(3) pp. 143-148. Paper 1876-4029/10. (2010)
- [L2] **L. M. Molnár**, Sz. Nagy, I. Mojzes: Structural entropy in detecting background patterns of AFM images. VACUUM 84: pp. 179-183. (2009)
- [L3] **László Milán Molnár**, Tamás Hurtony, Attila Bonyár, Péter Gordon, Gábor Harsányi: Intermetallic layer formation during laser soldering: an AFM study, J. OF ALLOYS AND COMPOUNDS, bírálat alatt.
- [L4] Attila Bonyár, **László Milán Molnár**, Gábor Harsányi: Localization factor: a new parameter for the quantitative characterization of surface structure with atomic force microscopy (AFM), MICRON 43 pp. 305-310. (2012) 10.1016/j.micron.2011.09.005
- [L5] Sz. Nagy, A. Fehér, **L. M. Molnár**: Structural Entropy Based Localization Study of Wavelet Transformed AFM Images for Detecting Background Patterns. PIERS ONLINE 7:(5) pp. 441-445. (2011)

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [K1] **László Molnár Milán**, Szabolcs Dávid, Gábor Harsányi: Atomic Force Measurement of adsorbed water on AgPd thick films, MPA-2010 International Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Emerging Technologies, Portugal, 28-30 July 2010, MPA185, abstract: 122. oldal.
- [K2] **László Milán Molnár**, Szabolcs Dávid, Tamás Hurtony: Atomic Force Microscopy Investigations of Intermetallic Layers on Electronic Surface Finishings, Euronanoforum 2011, Budapest,

Tézispontokhoz nem kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L6] Olivér Krammer, **László Milán Molnár**, László Jakab, András Szabó: Investigating the Influence of Uneven Printed Wiring Board Surface on Volume Increment of Deposited Solder Pastes. MICRO AND NANOSYSTEMS 2:(3) pp. 163-169. (2010)

- [L7] Domján Dániel, **László Milán Molnár**, Eszter Bognár, Tibor Balázs: Development of Polymer Coatings for Coronary Stents. MATERIALS SCIENCE FORUM 659: pp. 141-146. Paper 10.4028/www.scientific.net/MSF.659.141. (2010)
- [L8] Varga Bernadett, Mojzes Imre, Nagy Szívia, **Molnár Milán László**: Fractal properties of AlGeNi layers on GaAs surfaces. VACUUM 84:(1) pp. 251-253. Paper 278. (2009)
- [L9] Olivér Krammer, **László Milán Molnár**, László Jakab, András Szabó: Modelling the effect of uneven PWB surface on stencil bending during stencil printing process, MICROELECTRONICS RELIABILITY 52 pp. 235-240. (2012), doi:10.1016/j.microrel.2011.08.012
- [L10] Molnár Gergely, **Molnár László Milán**, Bojtár Imre: Preparing a comprehensive analysis of the mechanical classification of structural glass, MATERIALOVÉ INŽINIERSTVO-MATERIALS ENGINEERING (ISSN: 1335-0803) 19:(2) pp. 71-81. (2012)

Lektorált, idegen nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

- [L11] **L. M. Molnár**, I Mojzes, S. Misák: 1D nanostructures grown on GaAs and InP, PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING 52: pp. 111-115. (2008)

Lektorált, magyar nyelvű folyóiratcikk

- [L12] Molnár Gergely, **Molnár László Milán**, Bojtár Imre: Multi-scale analysis of structural glass, imaging of the mesostructure: A szerkezeti üveg többszintű vizsgálata – a mezostruktúra feltérképezése ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA (ISSN: 1215-8410) 1: pp. 1-16. (2012)

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [K3] O Krammer, **LM Molnár**, L. Jakab, C. Klein: Investigating the Increment of Deposited Solder Paste due to Uneven PCB Surface. In: 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE2010. Warsaw, Lengyelország, 2010.05.12-2010.05.16. pp. 133-137.
- [K4] Domján D, **Molnár LM**, Bognár E, Dévényi L: Porous polymer coatings for stents. In: 27th DANUBIA-ADRIA Symposium on Advances in Experimental Mechanics. Wroclaw, Lengyelország, 2010.09.22-2010.09.25. pp. 1-2.
- [K5] O Krammer, **LM Molnar**, L Jakab, C Klein: Stencil Deformation during Stencil Printing. In: 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics. Gyula, Magyarország, 2009.09.17-2009.09.20. pp. 179-184. Paper D006.
- [K6] Dániel Domján, **László Milán Molnár**, Eszter Bognár, Tibor Balázs: Development of Polymer Coatings of Coronary Stents. In: Development of Polymer Coatings of Coronary Stents. Balatonkenese, Magyarország, 2009.10.11-2009.10.13. p. 1. Paper P-21.
- [K7] Dániel Domján, Eszter Bognár, **László Milán Molnár**, Imre Mojzes: Coronary Stents with Polyurethane Coating. In: Book of Abstracts of the Israeli-Palestinian Workshop on Nanotechnology. Miskolc, Magyarország, 2008.12.10-2008.12.12. Miskolc: p. 36. Paper P4.
- [K8] Krammer O, Kobilák I, **Molnár L.M.**: Method for selective solder paste application for BGA rework. In: 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2008. Budapest, Magyarország, 2008.05.07-2008.05.11. Budapest: pp. 432-436. Paper F023.

- [K9] Ákos Nemcsics, Enikő Horváth, Szilvia Nagy, **László Milán Molnár**, Imre Mojzes, Zsolt J. Horváth: Some Remarks to the Nanowires Grown on III-V Substrate. In: ASDAM 2008 The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Szlovákia, 2008.10.12-2008.10.16. IEEE, pp. 215-218.

Magyar nyelvű könyv

- [Kö1] Mojzes Imre, **Molnár László Milán**: Nanotechnológia. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2007. 213 p. (ISBN:978-963-420-918-8)

Hivatkozások

- [1] Sinkovics B. –Gordon P. –Harsányi G.: Computer modelling of the laser ablation of polymers. Applied Thermal Engineering, 30, 2492–2498. p., 2010.
- [2] Hurtony T.: Simulation and modeling of laser ablation. In 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2008. Budapest, Magyarország (konferenciaanyag). 2008, IEEE, 452–457. p.
- [3] Hurtony T. –Gordon P. –Balogh B.: Formation and Distribution of Sn-Cu IMC in Lead-Free Soldering Process Induced by Laser Heating. Micro and Nanosystems, 2 (3), 178–184. p., 2010.

Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt megköszönöm a támogatást a tragikus hirtelenséggel elhunyt Dr. Mojzes Imre Professor Úrnak, aki a Doktori Iskola alatt témavezetőként figyelte és segítette munkámat. Ezt az értékezt az ő emlékének ajánlom.

Megköszönöm témavezetőmnek, Dr. Harsányi Gábornak, hogy a doktori iskola alatt segítette beilleszkedésemet a Tanszék életébe, és megtalálta a villamosmérnöki tudományon belül azokat a diszciplínákat, amelyeket – mérnök-fizikus végzettségemnél fogva – sikerrel művelhetek és folyamatos tanácsaival hozzájárult az értekezésem elkészültéhez.

Kutatásom infrastrukturális és anyagi feltételeinek előteremtésével a BME Elektronikai Technológia Tanszékének vezetősége nagyban hozzájárult munkám eredményességéhez; köszönöm Dr. Harsányi Gábornak és Dr. Jakab Lászlónak, hogy vezetésükkel egy dinamikus fejlődő, és az új technológiák felé nyitó Tanszék munkatársa lehetek.

Szeretném ezúton megköszönni minden társszerzőmnek és kutatótársamnak, akivel szerencsém volt együtt dolgozni az elmúlt néhány évben. Külön köszönet illeti Dávid Szabolcs, Hurtony Tamás és Bonyár Attila hallgatókat, amiért segítséget nyújtottak a laboratóriumi kísérletek elvégzésében, valamint Dr. Sinkovics Bálint, Dr. Krammer Olivér, Dr. Gordon Péter és Dr. Bognár Eszter kollégáimat azért, mert bármilyen szakmai kérdéssel fordulhattam hozzájuk.

Külön köszönetemet fejezem ki minden olyan cégnek vagy szervezetnek, amelyek közvetlenül vagy közvetetten támogatták az egyetemi munkámat:

- Robert Bosch Elektronikai Kft, Hatvan,
- Nokia Magyarország Komárom Kft,
- Infineon Technologies Cegléd Kft,
- Imedim Kft.

Külön köszönöm meg az EFI Services Kft. minden munkatársának azt, hogy műszeres ismereteikre és lelkesedésükre mindenkor támaszkodhattam.

Köszönöm az Új Széchenyi Terv keretei között megvalósuló, „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című, TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 jelű pályázat anyagi támogatását. Az értekezésben bemutatott új tudományos eredmények az említett pályázat időtartama alatt, annak Nanotudomány, nanotechnológia és anyagtudomány alprojektjének részeként születtek meg.

A Családom támogatása és biztatása fontos hajtóerőt jelentett a doktori munkám során; külön megköszönöm szüleimnek, testvéremnek, feleségemnek, Eszternek és lányomnak, Emmának, hogy a mindig mellettem álltak.

