



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

FELÜLETEK LOKÁLIS MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA
ATOMERŐ MIKROSKÓPIÁS ELJÁRÁSOKKAL

Tézisfüzet

Kámán Judit

Témavezető: Dr. Bonyár Attila, egyetemi docens

BUDAPEST
2020. március

A kutatás motivációja és előzményei

Az atomerő mikroszkópot (AFM-et) 1986-ban Binnig és Quate találta fel felületek topográfiájának feltérképezésére, bővítve ezzel a pásztázószondás mikroszkópok családját. Nagy előnye a képalkotás egyszerűségében rejlik: a felület változásait egy érzékeny rugólapkára szerelt tűvel követjük le, aminek segítségével akár ~ 0.05 nm-es vertikális felbontás és ~ 0.2 nm-es horizontális felbontás is elérhető [1].

Az alapkutatások során hamar kialakult az igény a topográfia felvételén kívüli egyéb, a tű és a minta kölcsönhatásából származtatható, a mintára jellemző lokális tulajdonságok meghatározására. Így az AFM kompetenciái számos területen kibővültek. Ezek közül az elmúlt években kiemelt jelentőséget kapott a mechanikai tulajdonságok vizsgálata. A téma fontosságát mutatja, hogy a legtöbb AFM-gyártó aktuális újtása ehhez a területhez kapcsolódik (Bruker: QNM és Force Volume modulok, Asylum Research: Bimodal Dual AC Imaging modul, Park AFM: PinPoint nanomechanikai mód, stb.). Az erre dedikált modulok különböző fizikai elveket és modelleket alkalmaznak a különféle mechanikai paraméterek mérésére, és fejlesztéseik napjainkban is folynak. A legelterjedtebben meghatározott mechanikai paraméter a Young-modulus, mivel e mennyiség mérése egy általános AFM-mel is megvalósítható, mellőzve bármiféle speciális hardveres kiegészítést. A Young-modulust megadó modulok működése és az eredmények megbízhatósága nagyban függ a felhasználó által megválasztott paraméterektől (illesztett mechanikai modell, illesztés kezdőpontja, a görbe hány százalékát használja a kiértékelő modul, stb.), illetve a modulok konkrét megvalósításától, melynek egy részét általában ipari titok védi.

Kutatásaim motivációja volt, hogy az AFM-mel történő rugalmassági modulus meghatározására olyan kiértékelést segítő módszert adjak, mely az eddigieknél megbízhatóbb Young-modulus értékek megállapítására törekszik és jól alkalmazható más tudományterületen működő szakemberek számára is.

A kutatási terület egyes megoldandó problémái –Célkitűzés

A legelterjedtebben használt, ún. lézerreflexiós elvű AFM-es képalkotási technika során a tűt tartó rugólapka hátlapjára egy lézernyaláb esik be, ami innen visszaverődve egy pozíció-érzékeny fotodetektorban nyelődik el, lehetővé téve ezzel a rugólapka elhajlásának érzékelését. Ennek megfelelően minden AFM-es mérés első lépése a villamos feszültségként kinyert elhajlás átkonvertálása hossz mértékegységre (nano- vagy mikrométerre). Ennek standard menete, hogy a további mérések

megkezdése előtt a tű rugóállandójához képest egy ideálisan kemény és ideálisan sima (pl. szilícium-szelet) felületen végzünk kontakt módú pont-spektroszkópiát, biztosítva ezzel, hogy a minta nem nyomódik be. Ekkor a felvett görbe meredekségéből meghatározható a keresett átváltási érték, az ún. inverz optikai érzékenység (InvOLS).

A rugalmas minták Young-modulusának mérésekor az elsődleges cél, hogy a tű és a minta kölcsönhatását megadó, ún. erőgörbéből, a kontakt mechanikából ismert modellek illesztésével meghatározzuk a rugalmassági modulusot.

A Young-modulus mérését szintén a kontakt módú pont-spektroszkópia teszi lehetővé. A mérés során a tűt belenyomjuk a felületbe és visszahúzzuk, s eközben a tűt tartó rugólap deformációját mérjük a mintát mozgató piezokerámia abszolút helyzetének függvényében. Ezen folyamat során a tű deformálja az anyagot, így feltételezhető, hogy a rugalmassági tartományon belül alkalmazhatóak a már ismert, a tű és a minta alakjának megfelelően megválasztott mechanikai kontaktusokat tárgyaló modellek [3], melyek segítségével meghatározható a Young-modulus. Ahhoz, hogy az adott modell illeszthető legyen, a felvett görbét az ún. *erőgörbévé* kell áttranszformálni. Ezen átalakítás annyira esszenciális, hogy a szakirodalomban számos helyen a felvett görbére erőgörbe néven utalnak. Az erőgörbe a rugólapra ható erőt mutatja a tű és a minta távolságának, ill. a minta benyomódásának –a szakirodalomban használt kifejezéssel élve, a tű-minta *szeparációjának*– függvényében. Az átalakítás első lépése a rugólap elhajlása által szolgáltatott jel feszültségről nm-re történő átváltása, a fentebb említettek szerint. A következő lépés a tű és minta első érintkezési pontjának, a kontakt-pontnak a meghatározása. Ez jelenti a kezdőpontot a modellillesztés során. Ezután a modellillesztésből kapott paraméterből a tűt jellemző konstansok ismeretében megkapható a minta Young-modulusa.

A mérési összeállítás során kiemelkedően fontos a tűt tartó rugólap/konzol rugóállandójának (k) megfelelő megválasztása, melynek értéke az anyag rugalmasságához kell, hogy igazodjon. Ugyanis a mérés során nyert erőgörbe a felület elasztikus deformációjának, valamint a konzol deformációjának együttes hatásaként jelentkezik. Abban az esetben kapunk kiértékelhető mérést, ha a konzol és a minta deformációja egy nagyságrendbe esik, különben a konzolnál sokkal keményebb anyag esetén csak a konzolra jellemző görbét látunk (ez történik a kalibrálás során), illetve a konzolnál sokkal puhább minta esetén az anyag nyomódik be a konzol megfelelően mérhető elhajlása nélkül, így szintén nem jelenik meg a mérendő anyagra vonatkozó információ.

Tehát a méréshez és a kiértékeléshez szükséges kritikus lépések röviden összefoglalva (*):

- megfelelő rugóállandójú tű kiválasztása
- inverz optikai érzékenység (InvOLS) meghatározása
- az illesztési modell megválasztása, valamint az illesztés határainak meghatározása

A fentiekben ismertetett, a Young-modulus meghatározására elterjedt módszer számos, a szakirodalomban nem tárgyalt hiányossággal küzd, melyeket röviden a (*) szerinti lépési sorrendben szeretnék bemutatni.

A különböző AFM gyártó cégek esetenként a saját moduljukhoz tesznek ajánlást arra vonatkozóan, hogy adott rugalmassági tartományba eső anyagokhoz **milyen rugóállandójú tű** alkalmazása válhat be, azonban ezek legtöbbször az általános kontakt-módú pont-spektroszkópiánál speciálisabb mérési módban érvényesek. Annak problémája, hogy egy ismeretlen rugalmasságú minta esetén hogyan válasszuk meg a megfelelő rugóállandójú tűt, amivel kiértékelhető görbe vehető fel, illetve hogy egyáltalán milyen alakú görbe adhat releváns Young-modulust, még nyitott kérdés.

Az **InvOLS** meghatározása esetében, az általános módszer szerint (pl. AFM-gyártók ajánlása), a fent leírt kalibrációt a mérés elején végzi el a felhasználó. Az így kapott értéket használja a továbbiakban, függetlenül attól, hogy változhatnak a beállított paraméterek mérés közben (pl. lézerpozíció, a minta topográfiája, tű-minta beesési szöge, stb.). Ezen változások hatására bekövetkező mérési hiba megjelenésével és nagyságával eddig a szakirodalom még nem foglalkozott, azonban jelenléte az összes kiértékelési mód esetén közvetlen ráhatással van az eredményekre. Ezeket figyelembe véve felmerül az igény egy olyan kalibrációs módszer létrehozására, mely mérés közben, az aktuális geometriához igazodva adja meg az aktuális InvOLS faktort.

A **modellillesztéshez** kapcsolódóan a kontakt-pont különböző esetekre történő helyes meghatározását és ennek algoritmizálhatóságát igen széles szakirodalom taglalja, azonban az illesztés végpontjának meghatározására nincsen általánosan elfogadott módszer. A probléma relevanciáját adja, hogy a modellek elméleti háttere arra támaszkodik, hogy a kontaktálás az anyag rugalmas deformációjához köthető tartományban zajlik, így az illesztési végpont meghatározásával gyakorlatilag a modellek érvényességi tartományának kijelölése történik. A szakirodalom nem vizsgálja, hogy hogyan függ a Young-modulus értéke fix modell és fix kezdőpont

kiválasztás mellett a végpont megválasztásától, valamint, hogy milyen mértékű hibát tud okozni, ha elhagyjuk a modell érvényességi körét és nem ad módszert arra, hogy ez hogyan ismerhető fel.

Disszertációm célja a Young-modulus AFM-mel történő meghatározása esetén módszertől, mérés technikától és alkalmazott modelltől függetlenül megjelenő problémák megoldása. Mivel ezeket a legáltalánosabban elterjedt mechanikai mérésre alkalmas módszeren keresztül vizsgálom, így a megoldások AFM-től és gyártótól függetlenül is érvényesek maradnak.

A jelenlegi módszerekben tapasztalt hiányosságoknak megfelelően elsődlegesen a következő részfeladatok megoldására törekedtem:

1. Olyan módszer kidolgozása, mely segít elkülöníteni a különböző görbetípusokat és támpontot nyújt a minta rugalmassági tartományához megfelelő rugóállandójú tű megválasztásában, mely elengedhetetlen ahhoz, hogy megbízható Young-modulus értékeket kapjunk.
2. Olyan módszer fejlesztése, melynek során a kalibráció és a mérés nem különül el, és segítségével meghatározható az adott pontspektroszkópiával mért görbe esetén az aktuális, a mérési elrendezésnek és a minta lokális topográfiájának megfelelő InvOLS érzékenység.

A Young-modulus mérési nehézségéhez hozzátartozik, hogy a fentiekben és (*)-ban felsorolt lépések szorosan összefüggenek, és például annak megválaszolására, hogy a megfelelő rugóállandójú tűt választottuk-e, csak a felvett görbe elemzéséből tudunk következtetni, amihez szükséges a konverziós faktor ismerete is. Ennek megfelelően, bár a mérés kivitelezése technikailag a (*)-ban leírt sorrendet követi, a fenti problémák megoldásához a kulcsot elsődlegesen a felvett erőgörbék elemzése és osztályozása jelenti, így a tézisek ehhez igazodó logikai sorrendben követik egymást.

Az értekezésben megfogalmazott új tudományos eredmények

1. Tézis: Új módszert dolgoztam ki az atomerő mikroszkópiával felvett erőgörbékre történő modell illesztés során az illesztési végpontok kiválasztásának optimalizálására. A módszer lényege, hogy az erőgörbe végpontjából egyeneseket illesztve a görbe többi pontjába létrehozható egy meredekségi görbe, melynek vizsgálatával meghatározható az a pont, ahol elkülönül a tút tartó konzol rugalmas alakváltozása által dominált szakasz a minta rugalmasságával jellemezhető szakasztól.

Magyarázat

- a.) A kidolgozott módszer azon igazolt megfigyelésen alapul, hogy a felület rugalmas alakváltozása valamint a tút tartó konzol rugalmas alakváltozása elkülöníthető szakaszokat képez megfelelően felvett erőgörbék esetén.
- b.) A módszer segíti a megfelelő illesztési végpont meghatározását a Hertz, Hertz-Sneddon és a DMT kontaktmechanikai illesztési modellek esetén.
- c.) Az a szakasz, amely tisztán a tút tartó konzol elhajlására jellemző, egyenes szakaszt határoz meg a meredekségi görbén.
- d.) A módszer a megfelelő illesztési végpontnak a minta rugalmas alakváltozását tükröző szakasz végéhez tartozó egyik pontot tekinti, nevezetesen a normalizált meredekségi görbén található plató értékének 95%-ához tartozó pontot.
- e.) Megmutattam, hogy az általam javasolt optimális illesztési végponttól való eltérés az erőgörbékre történő modellillesztés során szignifikáns (akár több mint 20%-os) hibát is okozhat a vizsgált felületre meghatározott Young-modulus értékében.

Az 1. tézishez köthető publikációk: [L1], [L3] – [L5], [K3] – [K5]

2. Tézis: Megmutattam, hogy az AFM-es erőgörbék három jellegzetes osztályba sorolhatók, mely besorolás segítségével adott rugalmassági tulajdonságokkal rendelkező felület esetén megtalálható a megfelelő rugóállandójú tű, amellyel felvett erőgörbére optimális illesztési módszer alkalmazható. A módszer alapján megbecsülhetők a rugalmassági tartományok, melyeken belül a minták Young-modulusa mérhető az adott rugóállandójú tűkkel végzett pont-spektroszkópiás mérésekkel.

Magyarázat:

- a.) Megmutattam, hogy az AFM-es erőgörbék három jellegzetes osztályba sorolhatók. A két legegyszerűbb esetben a görbe vagy tisztán a tűt tartó konzol elhajlására jellemző szakaszt vagy a minta rugalmassága által dominált szakaszt tartalmazza, míg a harmadik esetben mindkettőt.
- b.) Igazoltam, hogy a három jellegzetes erőgörbe típust a felület Young-modulussal jellemzett elasztikus tulajdonságainak illetve a méréshez használt konzol rugóállandójának egymáshoz képesti viszonyától függően lehet elkülöníteni.
- c.) Megmutattam, hogy adott Young modulusú anyaghoz megfelelően választott rugóállandójú konzollal felvehető olyan erőgörbe, mely tartalmazza mindkét jellegzetes szakaszt, ezáltal alkalmazható rá az I. Tézisben ismertetett optimális végpont kiválasztási módszer.
- d.) Különböző dóziszú protonnyalábbal besugárzott PDMS mintasorozat segítségével azt találtam, hogy a 0.2 N/m-es rugóállandójú tű 4 MPa – 830 MPa, az 5 N/m-es rugóállandójú tű 830 MPa – 16.7 GPa közötti rugalmassági tartományú minta AFM-es pont-spektroszkópiával történő Young-modulus mérésére alkalmas.

A 2. tézishez köthető publikációk: [L1], [L3] - [L5]

3. Tézis: Bebizonyítottam, hogy az AFM-es erőgörbe illesztési gyakorlatban, a kalibráció céljára elterjedten használt, ideálisan kemény és sík felületen mért optikai érzékenység (és az inverz optikai érzékenység) szignifikáns hibával lehet terhelt, mivel az aktuális mérési körülményeket (nevezetesen a lézerfolt pozícióját a konzolon és a tű-minta beesési szögét) figyelembe vevő inverz optikai érzékenység szignifikáns eltérést mutathat hozzá képest. Az általam javasolt új módszer egy adaptív inverz optikai érzékenység érték meghatározását teszi lehetővé, elkerülve a fenti problémákat.

Magyarázat:

- a.) Kísérleti és szimulációs módszerekkel igazoltam, hogy egy 5 N/m rugóállandójú konzollal SiO₂ felületen felvett, ideálisan kemény és sík anyagot jellemző erőgörbék meredekségéből származtatott inverz optikai érzékenység értéke kb. 1.5 %/μm érzékenységgel függ a konzol felületére fókuszált lézernyaláb pozíciójától.
- b.) Kísérletileg megmutattam, hogy az ideálisan kemény anyagot jellemző erőgörbék meredeksége (optikai érzékenysége) a tű és a felület kontaktálási szögének megváltozásától akár 10 %-ban is függhet a 10-15°-os szögtartományon belül (egy 0.2 N/m rugóállandójú konzollal protonnyalábbal besugárzott, ~30 GPa keménységű PDMS felületen)
- c.) A erőgörbék kiértékelése során meghatározott Young-modulus expliciten tartalmazza az inverz optikai érzékenységet, mely összefüggés vizsgálata arra vezetett, hogy ±20%-os eltérés az inverz optikai érzékenységben -40% - +60% hibát eredményez a Young-modulusban
- d.) Megmutattam, hogy a felület rugalmassági tulajdonságainak megfelelően, a II. Tézisben ismertetett módon kiválasztott rugóállandóval készült képek erőgörbéjén, a konzol rugalmas alakváltozását jellemző elkülönülő szakasz alkalmas az erőgörbék átskálázására, valamint igazoltam, hogy az így használt inverz optikai érzékenység, mivel tartalmazza a mérés aktuális, jellemző körülményeit (lézer pozíciója, kontaktálás szöge) alkalmasabb az erőgörbe átskálázására, mint az ideálisan kemény felületen külön mérés során felvett referenciaértékkel végzett átskálázás.

A 3. tézishez köthető publikációk: L2, K1, K2

Az eredmények hasznosulása

Az I-III. téziseimben bevezetett kiértékelési módszer hasznos eszköznek bizonyult az alábbi anyagrendszerek vizsgálatánál.

A polidimetilsziloxán (PDMS) az áttetszősége miatt gyakran alkalmazott polimer a mikro-, illetve nanotechnológia világában, elsősorban mikrofluidikai eszközökben és MEMS-rendszerekben. Azonban alkalmazásának gyakran szab korlátot az anyag kis Young-modulus és keménységi értéke, mely például nem teszi lehetővé nagy méretarányú mikrostruktúrák létrehozását. Huszánk Róbert (ATOMKI) kutatásaihoz kapcsolódva a bevezetett kiértékelési módszerrel sikerült meghatározni a különböző dóziszú protonnyalábbal besugárzott PDMS minták rugalmassági modulusának változását a dózis függvényében. A probléma nemtrivialitását a Young modulus széles skálán történő változása (\sim MPa – \sim 50 GPa), valamint a különböző felületi struktúrák megjelenése adta.

Kísérleti munkámmal a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékének ATOMKIval közösen folytatott kalkogenid kutatásaihoz csatlakoztam. A kalkogenidek számos alkalmazási területen megjelennek: memóriaelemek, optikai elemek és optikai szálak, valamint különböző szenzorok gyártásánál hasznosítják őket. Ezért a kutatások szempontjából kiemelkedő jelentőségű kalkogenid félvezetők fényindukált változásainak vizsgálata, mint a törésmutató, az optikai él vagy a térfogat változás tanulmányozása. A végbemenő fényindukált változás az anyagtól, valamint a megvilágítás hullámhosszától, intenzitásától és a hőmérséklettől függően lehet kristályos átalakulás vagy az amorf fázis megtartása mellett történő változás. Együttműködésünk során a különböző összetételű kalkogenidek esetén a lézerrel, illetve meghatározott energiájú elektronnyalábbal történő besugárzás hatására létrejövő struktúrák térfogat-, valamint elasztikus változásait vizsgáltam. Az eredmények közelebb vihetnek annak meghatározásához, hogy különböző besugárzások esetén milyen atomi mechanizmus alakítja ki a felszíni struktúrákat. Az ezirányú vizsgálatok jelenleg is folytatódnak.

Az eddig megvalósult konkrét hasznosulásokon kívül a módszer nagy segítséget nyújthat egy megbízható algoritmus kifejlesztésében, mely a következő lépéseket képes automatikusan elvégezni;

- eldönti, hogy az anyag rugalmas tulajdonságaihoz igazodó rugóállandójú tüvel történt-e a mérés, ha igen, akkor az alábbiakat végzi el
- meghatározza az aktuális konverziós faktort

- megadja a Young-modulust.

Egy ilyen program nagy segítséget jelenthet azon tudományterületek esetén, ahol nano-mérettartományú anyagok elasztikus mérése szükséges.

Atomerő mikroszkópos ismereteim és tapasztalataim beépítésre kerültek a BME-ETT mesterképzésén oktatott Nanotudomány tantárgyba is.

Publikációk

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L1] **J. Kámán**, R. Huszánk, A. Bonyár, "Towards more reliable AFM force-curve evaluation: A method for spring constant selection, adaptive lever sensitivity calibration and fitting boundary identification", **MICRON** 125: pp. 102717. (2019) (IF=1.53, Scimago: Q3)
- [L2] Á. G. Nagy, **J. Kámán**, A. Bonyár, R. Horváth, "Spring constant and sensitivity calibration of FluidFM micropipette cantilevers for force spectroscopy measurements", **SCIENTIFIC REPORTS** 9(1): pp. 10287. (2019) (IF=4.011, Scimago: D1)
- [L3] R. Huszánk, A. Bonyár, **J. Kámán**, E. Furu, "Wide range control in the elastic properties of PDMS polymer with ion (H+) beam irradiation", **POLYMER DEGRADATION AND STABILITY** 152: pp. 253-258 (IF = 3.78, Scimago: D1)
- [L4] J. Kámán, A. Bonyár; „Investigation of the Local Mechanical Properties of the SAC Solder Joint with AFM”, **MATERIALS SCIENCE FORUM** 885: pp. 269-274. (2017) (IF: -, Scimago: Q3)

Lektorált, idegen nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

- [L5] **Judit Kámán**, „Young’s Modulus and Energy Dissipation Determination Methods by AFM, with Particular Reference to Chalcogenide Thin Film”, **PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE** 59(1): pp. 18-25. (2015) (Scopus, Scimago: Q4)

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [K1] **Judit Kámán**, Attila Bonyár, Róbert Huszánk, "The effect of surface inclination on AFM force-curve calibration and evaluation", In: Proc of the 41th International Spring Seminar on Electronics Technology. Zlatibor, Serbia, (IEEE) (megírás alatt) (WoS, Scopus).

- [K2] **Judit Kámán**, Attila Bonyár, "Investigation of the AFM contact-mode force calibration with simulation", In: Proc of the 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia, Bulgária, (IEEE), pp. 1-4. (2017) (WoS, Scopus).
- [K3] **Judit Kámán**, Attila Bonyár, Tamás Hurtony, Gábor Harsányi, "Investigation of Surface Mechanical Properties of the Copper-Solder Interface by Atomic Force Microscopy" In: Proc of the 38th International Spring Seminar on Electronics Technology. Eger, Magyarország, (IEEE), pp. 425-430. (2015) (WoS, Scopus)
- [K4] **Judit Kámán**, Attila Bonyár, István Csarnovics, Csaba Cserháti, "Investigation of mechanical properties of the generated surface structures on a chalcogenide thin film with AFM", Proc of the 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging. Brasov, Romania, (IEEE), pp. 31-34. (2015) (WoS, Scopus)
- [K5] Attila Bonyár, **Judit Kámán**, István Csarnovics, "Elastic modulus and energy dissipation measurements with AFM on chalcogenide thin films", Proc of the 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging. Bucharest, Romania, (IEEE), pp. 31-34. (2014) (WoS, Scopus)

Tézispontokhoz nem kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L6] A. Bonyár, I. Csarnovics, M. Veres, L. Himics, A. Csík, **J. Kámán**, L. Balázs, S. Kökényesi, " Investigation of the performance of thermally generated gold nanoislands for LSPR and SERS applications", **SENSORS AND ACTUATORS B: CHEMICAL** **255**, pp. 433-439 (2018) (IF=5.401, Scimago: D1)
- [L7] A. Bonyár, I. Csarnovics, M. Veres, L. Himics, A. Csík, **J. Kámán**, L. Balázs, S. Kökényesi, "Investigation of the performance of thermally generated Au/Ag nanoislands for SERS and LSPR applications", **PROCEDIA ENGINEERING** **168**: pp. 1152-1155. (2016) (WoS, Scopus)

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [K6] Attila Bonyár, Attila Géczy, Olivér Krammer, Hunor Sántha, Balázs Illés, **Judit Kámán**, Zsolt Szalay, Péter Hanák, Gábor Harsányi, "A review on current eCall systems for autonomous car accident detection", In: Proc of the 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia, Bulgária, (IEEE) pp. 1-4. (2017) (WoS, Scopus)
- [K7] Attila Bonyár, **Judit Kámán**, István Csarnovics, László Balázs, "Characterization of the shape of gold nanoparticles prepared by thermal annealing", Proc of the 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging. Oradea, Romania, (IEEE) pp. 25-31. (2016) (WoS, Scopus)
- [K8] Peter Martinek, Zsolt Illyefalvi-Vitez, Oliver Krammer, Attila Geczy, Balazs Villanyi, Balazs Illes, **Judit Kaman**, Slavka Tzanova, "Building a Cloud Platform for Education in Microelectronics", In: Proc of the 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia, Bulgária, (IEEE), pp. 1-4. (2017) (WoS, Scopus)

Nem lektorált, magyar nyelvű folyóiratcikk

- [M1] **Kámán Judit**, „Felületek lokális mechanikai tulajdonságainak mérése AFM-el”, **ELEKTRONET XXV(1)**: pp.36-38. (2016)

Hivatkozások

- [1] Paul E. West "Introduction to Atomic Force Microscopy: Theory, Practice and Applications." URL: <http://www.paulwestphd.com>
- [2] L. G. Rosa, J. Liang "Atomic force microscope nanolithography: dip-pen, nanoshaving, nanografting, tapping mode, electrochemical and thermal nanolithography", *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 21, 483001, 2009,
- [3] H. J. Butt, B. Cappella, M. Kappl, "Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications", *Surface Science Reports*, Vol. 59, 2005, pp. 1-152.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Bonyár Attilának a szakmai irányítatását, tanácsait és az izgalmas közös munkát.

Továbbá szeretném megköszönni tanszékünk vezetőjének, Dr. Harsányi Gábornak, hogy hozzájárult a kutatáshoz szükséges feltételek megteremtéséhez, a tanszékhez való csatlakozásomhoz, valamint doktoranduszi éveim első felében elvállalta témavezetésemet.

Köszönettel tartozom Csarnovics Istvánnak, Cserhádi Csabának, Huszánk Róbertnek és Lenk Sándornak a közös munkáért.

Szeretnék hálás köszönetet mondani az EFI Lab minden kedves dolgozójának, emberi és szakmai támogatásukért. Külön köszönöm Hurtony Tamásnak a hasznos konzultációkat és beszélgetéseket.

Köszönöm a tanszék összes dolgozójának, hogy mindig számíthattam a segítségükre és barátságukra.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani Bolognai Egyetem Gyógyszer –és Biotechnológiai Tanszék tanszékvezetőjének, Dr. Giampaolo Zuccherinek és csapatának a náluk szerzett hasznos tapasztalatokért és azért az inspirációért, amit a közös munka jelentett számomra.

Végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani barátaimnak és családomnak folyamatos támogatásukért, különösen Szabados Anettnek és Csapó Péternek.

