

**Mikro- és nanoméretű erőmérő
szerkezetek**

PhD téziszfüzet

Radó János

Témavezetők:

Fürjes Péter, Volk János

Anyagtudományok és Technológiák

Doktori Iskola

2020.

I. A kutatás előzményei

PhD munkámat az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézeténél, a korábbi Mikrotechnológiai osztály MEMS laboratóriumában végeztem. A laboratóriumban – nevéhez híven – MEMS (Mikro-elektro-mechanikai rendszer) eszközök fejlesztése folyik, melyhez rendelkezésre áll egy teljes 1 μ m felbontású 4 hüvelykes szilícium megmunkálásra alkalmas technológiai sor. Az itt kutatott szenzorok között találhatók többek között nyomásmérők, gázérzékelők, energiagyűjtők, agyi elektródák és 3D erőmérők. Ez utóbbiak kutatása már néhány éves múltra tekintett vissza, mikor a munkába 2013-ban bekapcsolódtam [1]–[3]. Ebben az időszakban tervezték a kollégák az első SOI (szilícium szigetelőn) szeletre készült struktúrákat, melyeknél a membránvastagság az eszközréteg vastagságával tervezhető és szeleten belül homogén volt. Szintén erre az időszakra tehető a lúgos marás kiváltása DRIE (mélyreaktív ionmarás) szárazmarással, mely az egyenes oldalfalak – üreg és erőközvetítő elem - kialakítását tették lehetővé.

II. Célkitűzések

Első feladataim közé tartozott a SOI szeletre készülő erőmérő szerkezetek gyártásába történő becsatlakozáson túl, a szenzorok karakterizálásához szükséges mérőberendezés megtervezése és megépítése. A megépített háromdimenziós mérésre alkalmas berendezéssel pedig céloom az erőmérők irányfüggőségének mérésekkel történő alátámasztása, illetve a bevonat érzékenységre gyakorolt hatásának vizsgálata volt.

Ezt követően részt vettem az ENIAC INCITE nemzetközi projektben, ahol az erőmérő szenzor miniatürizálása volt a feladat. A projekt ugyanis egy olyan sebész laparoszkóp kifejlesztését célozta, melynek csipeszében erőmérő szenzorok mérik a csipesz szorító erejét, illetve a csipesz által megérintett szövet rugalmasságát. A miniatürizálás során céloom a legkisebb beültethető szilícium alapú MEMS erőmérő kifejlesztése volt. Ezt követően a méretek szubmikronos tartományba történő csökkentését tűztem ki célul piezoelektromos nanoszálak segítségével. Utóbbi munkámmal a PiezoMat projektbe is becsatlakoztam.

A miniatürizált erőmérő megtervezését és legyártását követő karakterizálása után részt vettem annak sebészcsipeszbe történő beültetésében is. Fontos szerepet vállaltam a csipesz megtervezésében, kialakításában, mely kritikus volt az erőmérés szempontjából.

Végül céлом volt a kifejlesztett erőmérő szerkezet gépjármű gumibroncsának oldalfalába történő beültetése is. A szenzorral a gumibroncs és az útburkolat között fellépő súrlódási erő menet közben történő monitorozását tűztem ki célul. Az ezzel kapcsolatos munkát – melyből szabadalom is született – a KOFAH hazai projekt keretében végeztem.

III. Vizsgálati módszerek

- a) A mikro-erőmérő szenzorok karakterizálásához az első mérések során egy goniométer állványból kialakított mérőállomást használtam, melyet később a Thorlabs vállalattól vásárolt alkatrészekből és motoros mozgatókból épített teljesen automatizált méréseket lehetővé tevő berendezésre cseréltem. A berendezéseket én terveztem és építettem. A szenzorok meghajtásához és a jelkiolvasáshoz a National Instruments mérőkártyáit használtam, melyekkel saját fejlesztésű LabVIEW fejlesztői környezetben írt szoftverekkel kommunikáltam. A terhelő erő méréséhez Andilog Centor Easy kalibrált erőmérőt használtam.
- b) A klímakamrás méréseket Weiss WKL60 típusú klímakamrában végeztem.
- c) A nanoszálak karakterizálását AIST NT, Smart SPM 1010 atomerő-mikroszkóppal végeztem.
- d) A nanoszálak minőségét LEO GEMINI pásztázó elektronmikroszkóppal ellenőriztem. Egyes vizsgálatokhoz a szükséges keresztmetszetet fókuszált ionnyalábbal állítottuk elő.

- e) A sebészcsipeszek biomechanikai tesztjeit a lengyel FRK (Foundation for Cardiology Development) által fejlesztett Robin Heart sebészrobot-rendszer segítségével végeztük.
- f) A gumiszenzor tesztjei a SZTAKI önvezető járművé alakított Nissan Leaf elektromos autójának segítségével történtek.

IV. Új tudományos eredmények

1, Elsőként vizsgáltam piezorezisztív erőmérő 3D irányfüggőségét és igazoltam kísérletileg különböző geometriai méretű eszközökön, különös tekintettel a méretcsökkentés hatásaira. A $940\mu\text{m}$ átmérőjű, $50\mu\text{m}$ vastagságú perforáció nélküli membrán esetén $8,3\text{mV/N/V}$; az ezzel azonos méretű, de perforált membrán esetén $57,5\text{mV/N/V}$; az $500\mu\text{m}$ átmérőjű $50\mu\text{m}$ vastagságú perforáció nélküli membrán esetén $16,0\text{mV/N/V}$; az azonos átmérőjű, de $20\mu\text{m}$ vastag membrán esetén pedig $75,7\text{mV/N/V}$ érzékenység adódott. Ez összevág a Comsol Multiphysics szoftverrel készített szimulációkkal. [S1], [S2], [S3] (5.-6. fejezet)

2, Kísérletileg határoztam meg a flexibilis bevonat hatását az erőmérő érzékenységére. $500\mu\text{m}$ átmérőjű, $50\mu\text{m}$ membrán vastagságú szenzor esetén arra jutottam, hogy az 1mm vastag PDMS bevonat a szenzor érzékenységét $0,84\text{mV/N/V}$ értékre, azaz 1/20-ára csökkenti, az érzékelő válaszidejét pedig $36\mu\text{s}$ -ról $60\mu\text{s}$ -ra növeli. [S1], [S3] (5.-6. fejezet)

3, Mérési eljárást dolgoztam ki piezoelektromos nanoszál alapú szubmikronos erőmérő oldalirányú terhelésének vizsgálatára tűszondás mikroszkóppal. A szubmikronos piezoelektromos félvezető ZnO nanoszál alapú erőmérő érzékenysége a mérések alapján 2mA/N-15mA/N közé esik. [S4] (7. fejezet)

4, Elsőként használtam félvezető alapú piezorezisztív MEMS erőmérőt, mint tapintásérzékelőt sebészrobot csipeszében, megteremtve ezzel az egyes szövetek megkülönböztetésének lehetőségét. A szövet érintését követő egyenletes elmozdulás alkalmazása mellett csontszövet esetén 200mN/mm, lágyszövet – bőr és izomszövet - esetén 125mN/mm átlagos rugalmassági paramétert mértem. [S1], [S2], [S5], [S6], [S7] (8. fejezet)

5, Kidolgoztam szorítóerőt mérő szenzor sebészcsipeszbe történő beültetési eljárását úgy, hogy a szenzor a csipesz harapási síkja alá süllyed, miközben a szenzoron kialakított polimer bevonat 200 μ m magasságban kiemelkedik a síkból. Ezzel sikerült megvalósítani, hogy a csipesz a robotgyártó által előírt feltételeknek megfeleljen,

azaz a szenzor mérési tartománya legalább 20N, tönkremenetele 100N feletti legyen. [S1], [S2], [S5], [S6], [S7] (8. fejezet)

6, Kidolgoztam egy használati mintaoltalommal védett eljárást, melynek segítségével egy 3D erőmérő úgy ültethető be egy gépjármű gumibroncsának belső oldalfalába, hogy az a jármű menetdinamikájának in situ monitorozását teszi lehetővé. [S8] (9. fejezet)

V. Eredmények hasznosítási lehetősége

Az 1. és 2. tézis eredményei szükségesek ahhoz, hogy megismerjük a szilícium alapú erőmérő szenzorok előnyeit és korlátait, azok ismeretében pedig felkutassuk a lehetséges alkalmazások körét.

Részben a 3. tézis eredményeit használtuk fel a PiezoMat projekt keretében fejlesztett nagyfelbontású ujjlenyomat-szenzor megvalósításakor. Az eredmények hasznosak lehetnek továbbá egyéb nanoszál alapú szenzorok – pl. mesterséges bőr – kutatása során is.

Részben a 4. és 5. tézis eredményein alapul az ENIAC INCITE projekt végére elkészült, sikeresen bemutatott laparoszkóp demonstrátor, melynek sikere nagyban hozzájárult a jelenleg futó – az INCITE folytatásának tekinthető - Position-II projektben való részvételhez. A csipesz továbbfejlesztése pedig nagyban segítheti a sebészrobotok által asszisztált műtétek sikerességét.

A 6. tézis eredményei jelentősen javíthatják egy jármű menetdinamikai monitorozó rendszerének hatékonyságát, illetve hozzájárulhatnak az önvezető járművek fejlesztéséhez.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- [1] É. Vázsonyi, M. Ádám, C. Dücs, Z. Vízváry, A. L. Tóth, and I. Bársony, “Three-dimensional force sensor by novel alkaline etching technique,” in *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2005, vol. 123–124, pp. 620–626.
- [2] M. Ádám, T. Mohácsy, P. Jónás, C. Dücso, É. Vázsonyi, and I. Bársony, “CMOS integrated tactile sensor array by porous Si bulk micromachining,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 142, no. 1, pp. 192–195, Mar. 2008.
- [3] D. Molnár, A. Pongrácz, M. Ádám, Z. Hajnal, V. Timárné, and G. Battistig, “Sensitivity tuning of A 3-axial piezoresistive force sensor,” in *Microelectronic Engineering*, 2012, vol. 90, pp. 40–43.

VII. Tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Doktori értekezés alapjául szolgáló publikációk:

- [S1] Radó, János, Csaba Dücső, Péter Földesy, Gábor Szébenyi, Zbigniew Nawrat, Kamil Rohr and Péter Fürjes, “3D force sensors for laparoscopic surgery tool,” *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 519–525, Jan. 2018., IF: 1,513, idézetek száma: 2
- [S2] Radó, Janos, Csaba Dücső, Péter Földesy, Gábor Szébenyi, Hunor Sántha, Kamil Rohr, Lukasz Mucha, Krzysztof Lis, Wojciech Sadowski, Dariusz Krawczyk, Piotr KroczeK, Zbigniew Małota, Zbigniew Nawrat and Péter Füijes, “Force sensitive smart laparoscope of ROBIN HEART surgical robot,” in *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, DTIP 2018, 2018, pp. 1–4., idézetek száma: 1

- [S3] Radó, J., C. Dücső, G. Battistig, G. Szebényi, G. Szebényi, P. Fürjes, Z. Nawrat and K. Rohr., “3D force sensors for laparoscopic surgery tool,” in *2016 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, 2016, pp. 1–4., idézetek száma: 4
- [S4] Bouvet-Marchand, A., A. Graillot, J. Volk, R. Dauksevičius, C. Sturm, M. Grundmann, E. Saoutieff, A. Viana, B. Christian, V. Lebedev, J. Radó, I. E. Lukács, N. Q. Khánh, D. Grosso and C. Loubat., “Design of UV-crosslinked polymeric thin layers for encapsulation of piezoelectric ZnO nanowires for pressure-based fingerprint sensors,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 6, no. 3, pp. 605–613, 2018., IF: 6,641, idézetek száma: 4
- [S5] Radó, János, Csaba Dücső, Péter Földesy, István Bársony, Kamil Rohr, Lukasz Mucha, Krzysztof Lis, Wojciech Sadowski, Dariusz Krawczyk, Piotr Kroczyk, Zbigniew Małota, Gábor Szebényi, Hunor Sántha, Zbigniew Nawrat and Péter Fürjes,

“Biomechanical Tissue Characterisation by Force Sensitive Smart Laparoscope of Robin Heart Surgical Robot,” *Proceedings*, vol. 2, no. 13, p. 1035, Nov. 2018., idézetek száma: 1

[S6] Nawrat, Zbigniew, Kamil Rohr, Péter Fürjes, Lukasz Mucha, Krzysztof Lis, János Radó, Csaba Dücso, Péter Földesy, Wojciech Sadowski, Dariusz Krawczyk, Piotr KroczeK, Gábor Szebényi, Pál Soós and Zbigniew Małota, “Force Feedback Control System Dedicated for Robin Heart Surgical Robot,” in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 168, pp. 185–188., idézetek száma: 6

[S7] Rorh, K., Péter Fürjes, L. Mucha, K. Lis, Janos Radó, Csaba Dücso, Péter Földesy, D. Krawczyk, P. KroczeK, Z. Malota, G. Szebényi and Z. Nawrat, “Robin Heart Force Feedback/Control System Based on INCITE Sensors: preliminary study,” *Med. Robot. Reports*, pp. 10–17, 2015., idézetek száma: 4

[S8] J. Radó, A. Nagy, and J. Volk, “Jármű gumiabroncs menetdinamikai állapotát mérő eszköz,” U 19 00189, 2019.

A dolgozathoz csak közvetetten kapcsolódó publikáció:

[S9] J. Radó, G. Battistig, A. E. Pap, P. Fürjes, and P. Földesy, “Thermal Noise Limited, Scalable Multi-Piezoresistor Readout Architecture,” Proceedings, vol. 1, no. 4. 2017., idézetek száma: 1

VIII. További tudományos közlemények

- [S10] M. Szappanos, J. Radó, G. Battistig, P. Földesy, and J. Volk, “Energy Harvesting Powered Wireless Vibration Analyser,” *Proceedings*, vol. 2, no. 13, p. 884, Nov. 2018.
- [S11] Udvardi, Péter, János Radó, András Straszner, János Ferencz, Zoltán Hajnal, Saeedeh Soleimani, Michael Schneider, Ulrich Schmid, Péter Révész and János Volk, “Spiral-Shaped Piezoelectric MEMS Cantilever Array for Fully Implantable Hearing Systems,” *Micromachines*, vol. 8, no. 10, p. 311, Oct. 2017., IF: 2,426, idézetek száma: 6
- [S12] Radó, János, Péter Udvardi, Saeedeh Soleimani, Lucky Kenda Peter, István Bársony, Péter Révész, and János Volk, “Low-Frequency Piezoelectric Accelerometer Array for Fully Implantable Cochlear Implants,” *Proceedings*, vol. 2, no. 13, p. 1059, Nov. 2018., idézetek száma: 1

[S13] Seifikar, Masoud, Björn P. Christian, János Volk, János Radó, István E. Lukács, Rolanas Dauksevicus, Rimvydas Gaidys, Vadim Lebedev, Antoine Viana, and Eoin P. O'Reilly., “Direct observation of spontaneous polarization induced electron charge transfer in stressed ZnO nanorods,” *Nano Energy*, vol. 43, pp. 376–382, Jan. 2018., IF: 15,548 idézetek száma: 1

Konferencia prezentációk:

- [1] Radó János, „Mikro- és nanoméretű erőmérők”, HTE előadás, Budapest, 2019.
- [2] János Radó et al, „Mechanical Energy Harvester Assisted Wireless Sensors”, WMRIF, Budapest 2019
- [3] János Radó et al, „Biomechanical tissue characterisation by force sensitive smart laparoscope of Robin Heart Surgical Robot”, Euroensors, Graz, 2018

- [4] János Radó et al, „Low-frequency piezoelectric accelerometer array for fully implantable cochlear implants”, Eurosensors, Graz, 2018
- [5] János Radó et al, „Force sensitive smart laparoscope of Robin Heart Surgical Robot”, DTIP, Rome, 2018
- [6] Radó János, „Tapintásérzékelés az orvosi robotikában”, MTA előadás, Budapest, 2017
- [7] János Radó et al, „Thermal noise limited, scalable multi-piezoresistor readout architecture”, Eurosensors, Paris, 2017
- [8] Radó János, „MEMS technológiával előállított 3D erőmérő szenzorok”, Kandó Konferencia, Budapest, 2017
- [9] János Radó et al, „3D force sensors for laparoscopic surgery tool”, DTIP, Budapest, 2016
- [10] János Radó et al, „Monitoring the tyre deformation on a vehicle on the run”, Eurosensors, Budapest, 2016
- [11] János Radó et al, „3D force sensors for laparoscopic surgery tool/for surgery robotics”, Roboty Medyczne, Zabrze, 2016

[12] Radó János et al, „3D mikro-erőmérő sebészrobot alkalmazáshoz”, OATK, Balatonalmádi, 2015

Egyéb konferencia prezentáció:

[13] Miklós Szappanos et al, „Energy Harvesting Powered Wireless Vibration Analyser”, Eurosensors, Graz, 2018