

Mikro- és nanoméretű erőmérők



Radó János
Energiatudományi Kutatóközpont
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
MEMS/NEMS Laboratórium



MEMS Laboratórium

Fizikai gőzfázisú rétegleválasztás

Vákuumgőzölés

Porlasztás

Kémiai gőzfázisú rétegleválasztás

APCVD

LPCVD

Atomi rétegleválasztás (ALD)

Száraz és nedves marási eljárások

Oxigén plazmamarás

Reaktív ionmarás (RIE)

Mélyreaktív ionmarás (DRIE)

Fotolitográfia

Tokozás

Szeletkötés



NEMS Laboratórium

Fizikai gőzfázisú rétegleválasztás

Vákuumgőzölés

Porlasztás

Litográfia

Maszkgenerátor

Elektronsugaras litográfia

Mikroszkópia

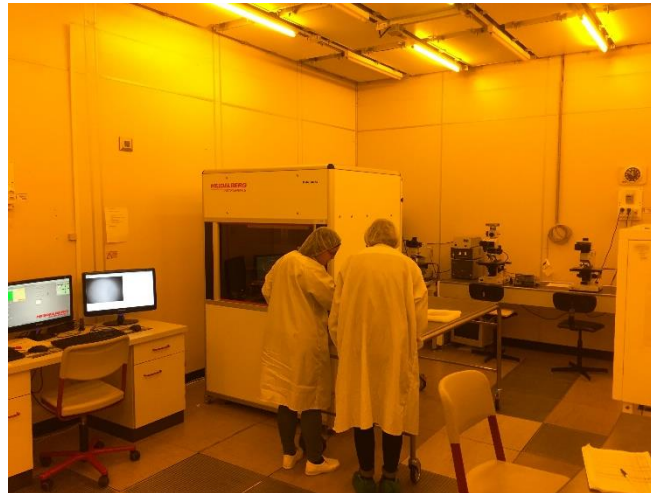
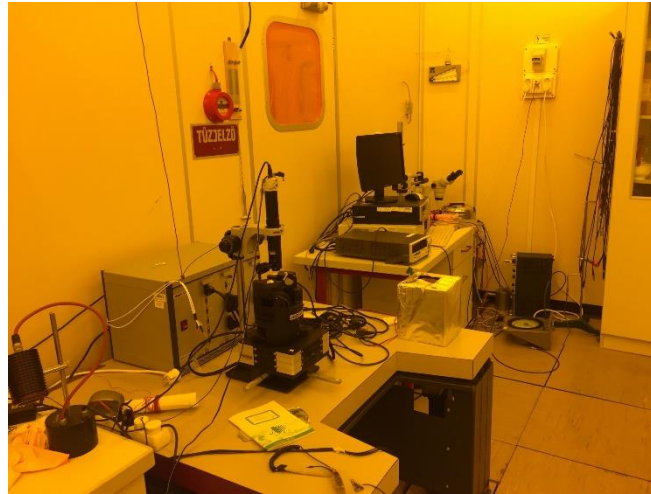
SEM

AFM

Nedves növesztési eljárás

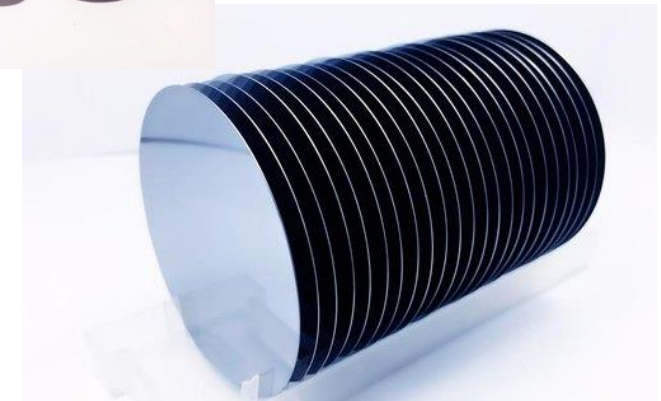
Tokozás

Chip beültetés



Mikro- és nanoelektromos szerkezetek (MEMS/NEMS)

- **Kiforrott CMOS-technológia**
 - **Szilícium, mint kiinduló anyag**
 - Kedvező elektromos tulajdonság
 - Kedvező mechanikai és termikus tulajdonságok
 - **Hatékony termelés**
- **Méretcsökkentés hatása**
 - Növekvő teljesítménysűrűség
 - Növekvő érzékenység
 - Javuló pontosság
 - Kisebb fogyasztás
 - Gyorsabb válaszidő



TRL 3-5

3D erőmérő szerkezetek

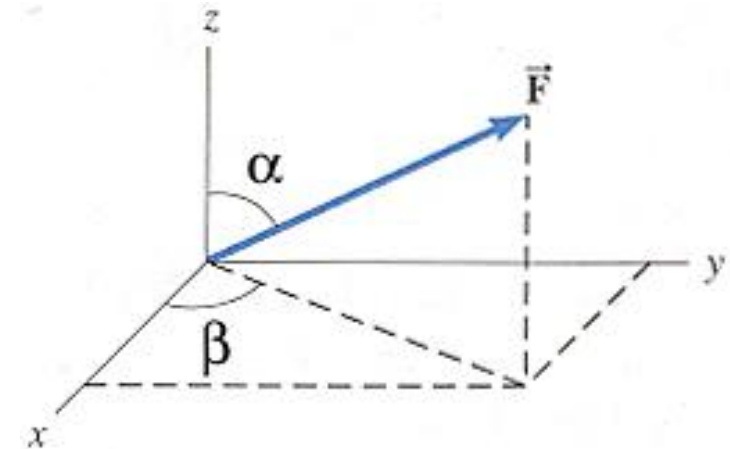
Cél:

Villamos jelekből reprodukálni a támadó erővektor:

- nagyságát és
- irányát.

Csoportosítás a jel átalakítási elv alapján:

- Piezorezisztív szenzorok
- Piezoelektromos szenzorok
- Kapacitív szenzorok
- Optikai szenzorok
- Magnetostrikciós szenzorok



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

Működési elv

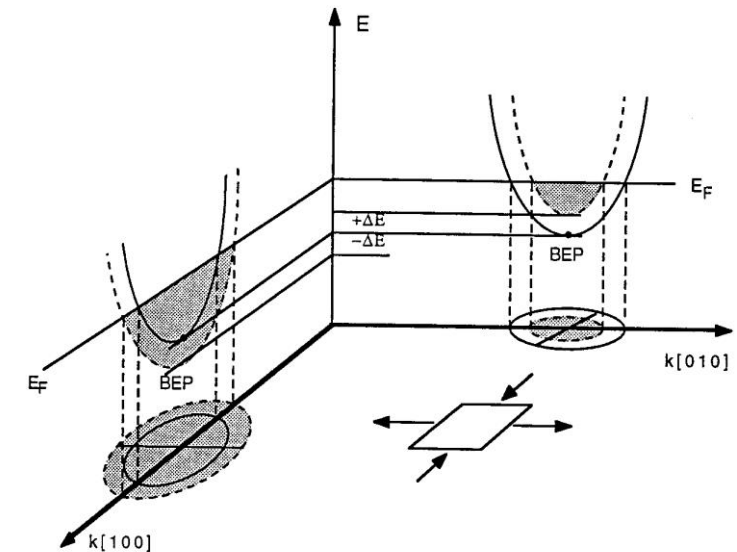
Külső erő hatására megváltozik a töltéshordozók mozgékonyága, így az anyag fajlagos ellenállása.

Előnyök:

- Egyszerű kialakítás
- Egyszerű kiolvasás
- Statikus erők egyszerű mérése
- Érzékenység egyszerű hangolása
- Nagyfokú CMOS kompatibilitás
- Nagy felbontás
- Megbízhatóság

Hátrányok:

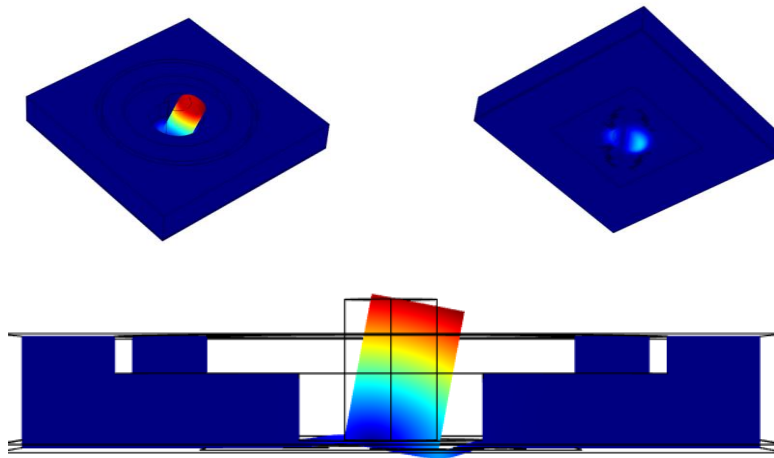
- Nagy fogyasztás
- Merev és törékeny



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

3D erőmérő szenzor

- Kis méret (1x1mm²-ig)
- Hangolható érzékenység
- Robosztus kialakítás (vs. érzékenység)
- Biokompatibilitás, sterilizálhatóság



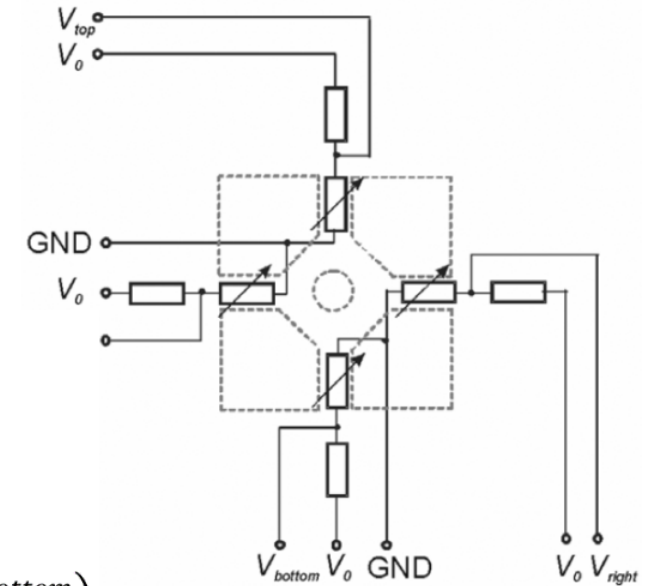
Működés:

- Szilícium membrán
- 4 piezoellenállás
- 4 feszültségosztó vagy Wheatstone-híd
- 3 erőkomponens, 3 egyenlet:

$$F_x = \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{right} - \Delta V_{left}),$$

$$F_y = \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{top} - \Delta V_{bottom}),$$

$$F_z = \frac{1}{V_0 \alpha_{ln} \pi_{44}} \left(\frac{\Delta V_{right} + \Delta V_{left} + \Delta V_{top} + \Delta V_{bottom}}{2} \right)$$

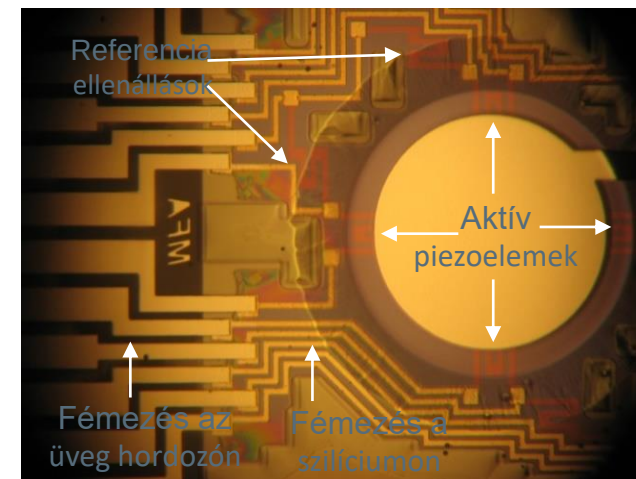
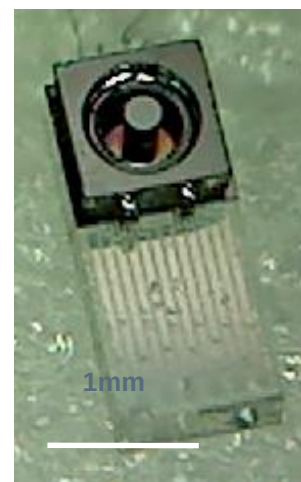
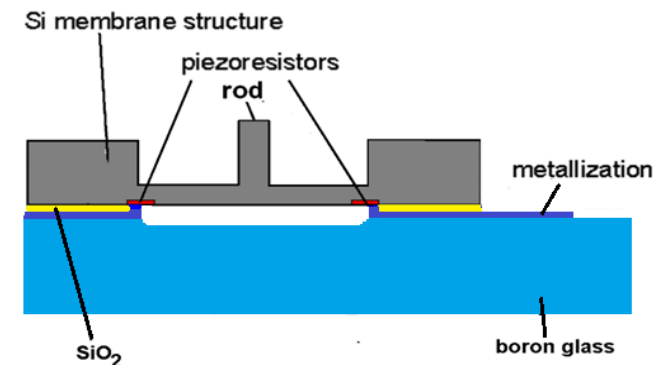


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

Technológiai kulcslépések:

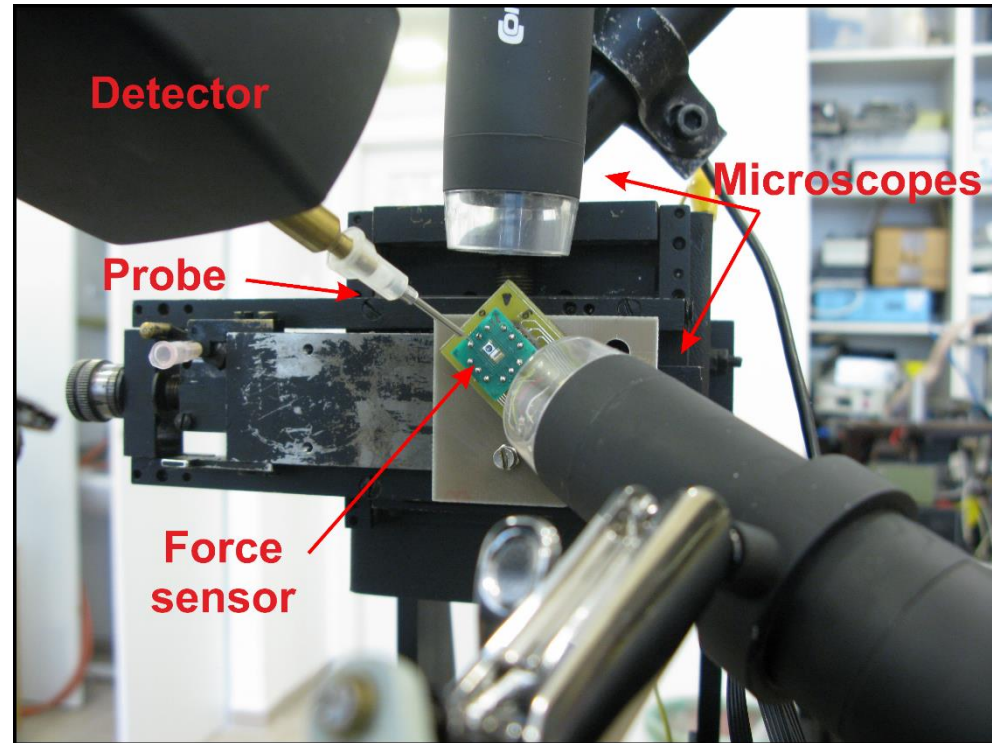
- Implantált ellenállások
- SOI szeletek az egységes membránvastagságért
- DRIE:
 - Meredek, függőleges oldalfalak,
 - A felületből kiemelkedő erőközvetítő elem
- Anódos kötés üveg hordozóhoz:
 - Mechanikai stabilitás, merevség
 - Kontaktuskivezetések

Cross section



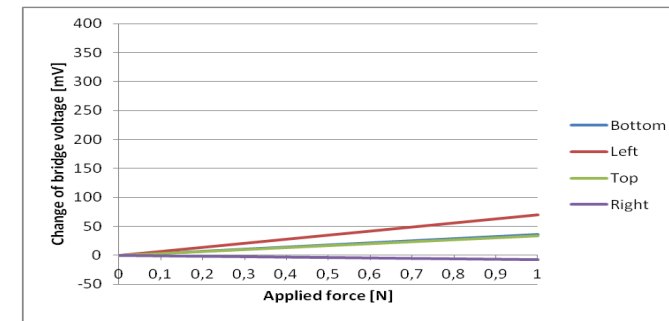
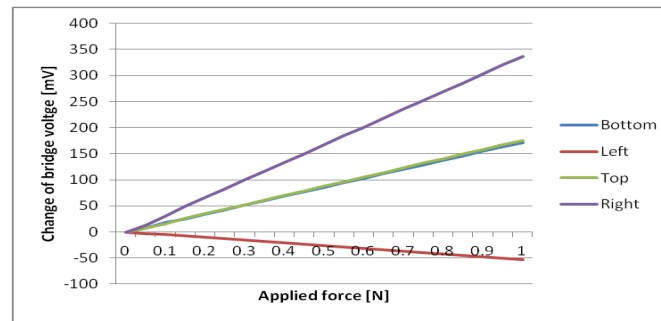
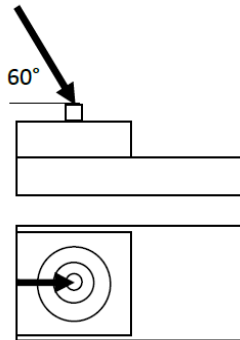
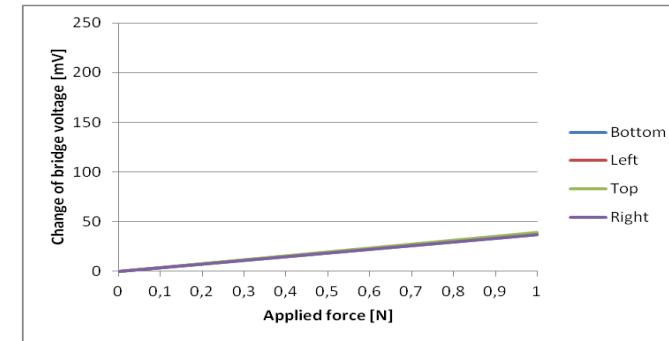
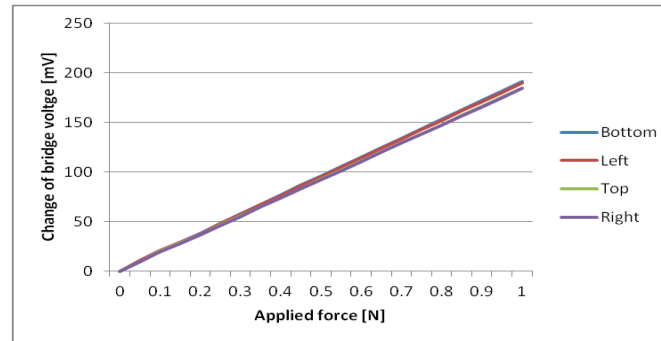
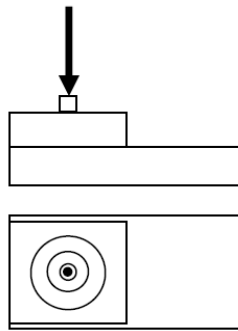
Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

Funkcionális tesztek – a mérési feladatra épített eszközzel



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

Funkcionális tesztek – a membránvastagság hatása

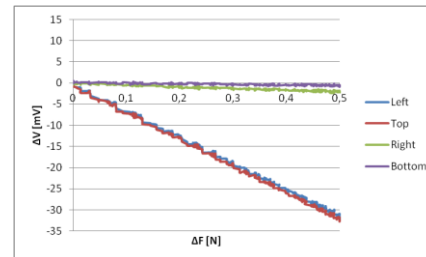
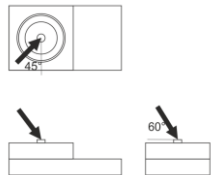
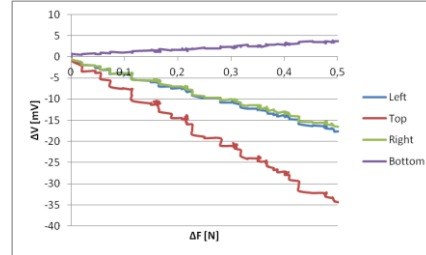
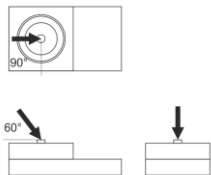
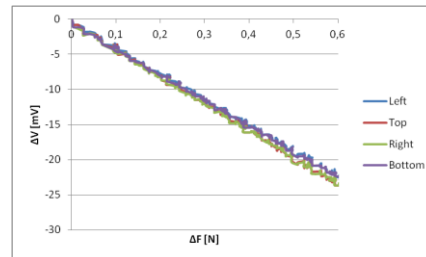
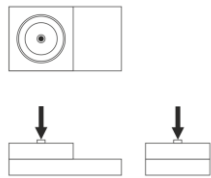


20 μm

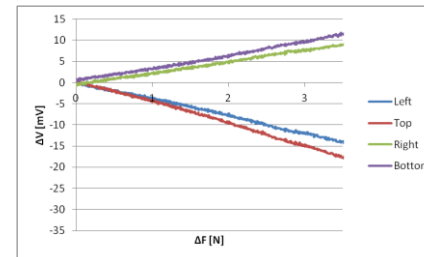
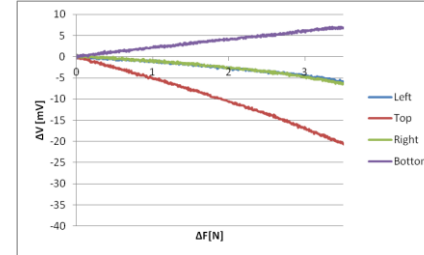
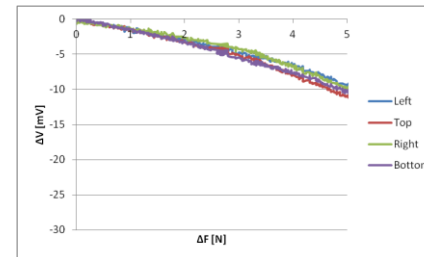
50 μm

Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok

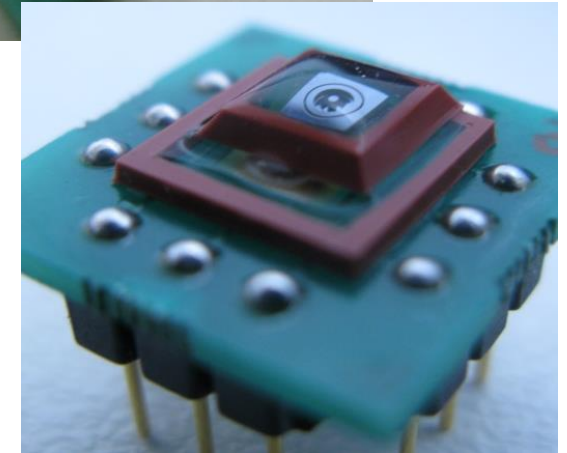
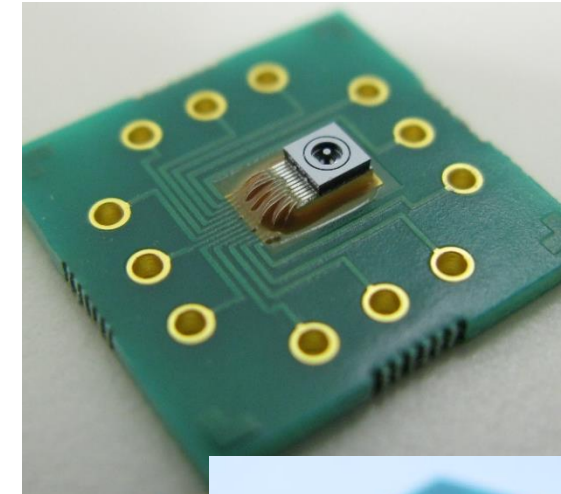
Funkcionális tesztek – a membránvastagság hatása



Bare sensor



Covered sensor

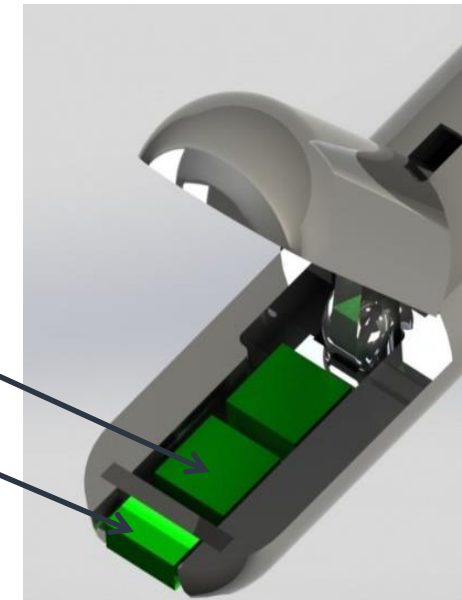


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS” LAPAROSZKÓP

Cél:

- 3D erőmérő szenzor integrálása sebészrobot laparoszópjába
- Folyamatos mérés és visszajelzés a
 - harapóerőről a csipesz belsejébe ültetett
 - a tapintásról a csipesz hegyére szerelt erőmérő szenzorok segítségével

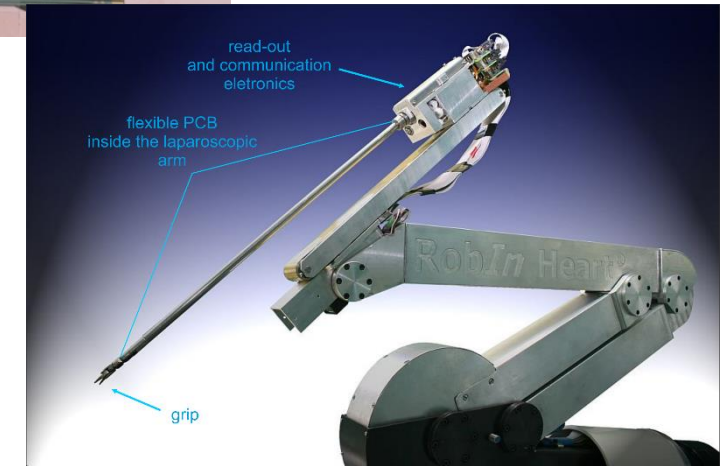
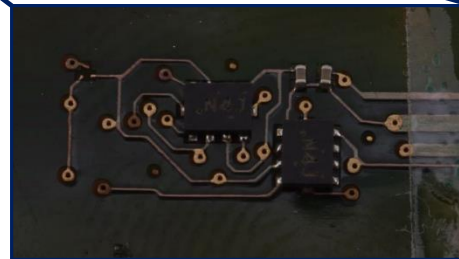


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS” LAPAROSZKÓP

Flexibilis nyomtatott
áramkör

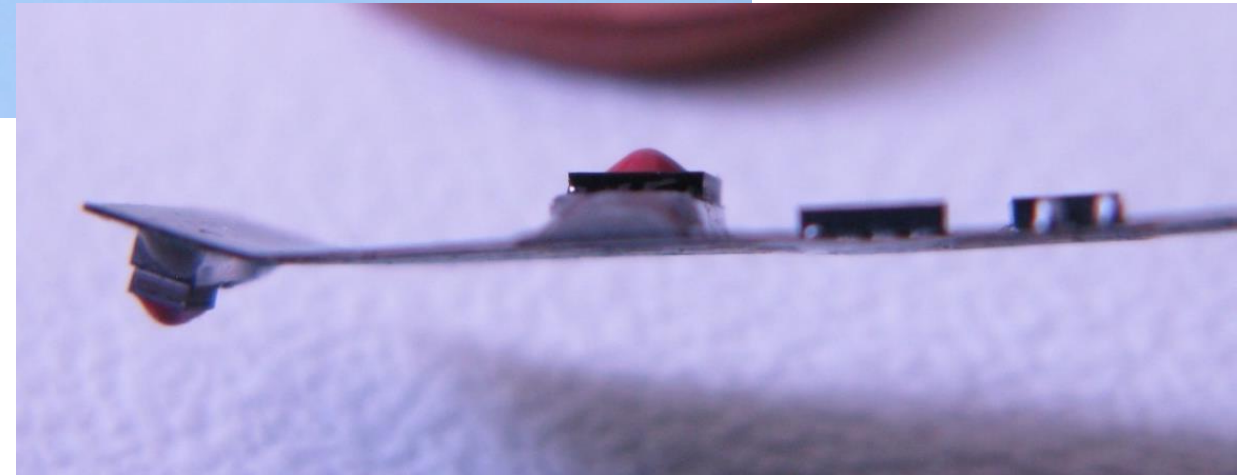
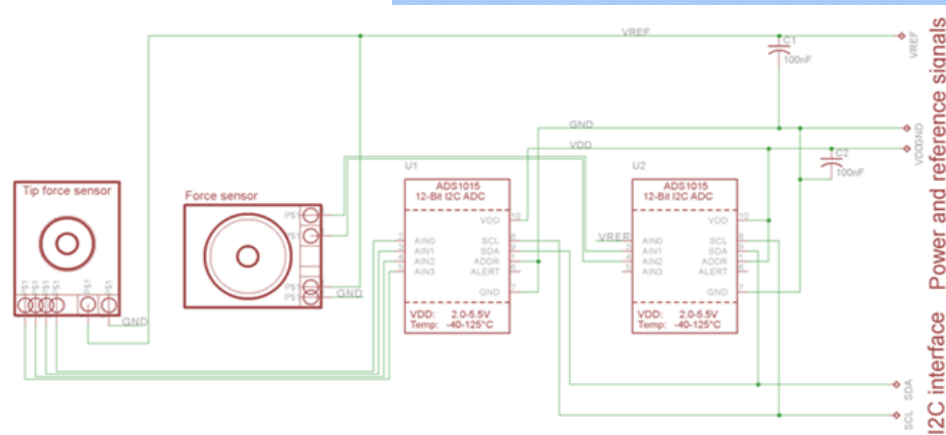
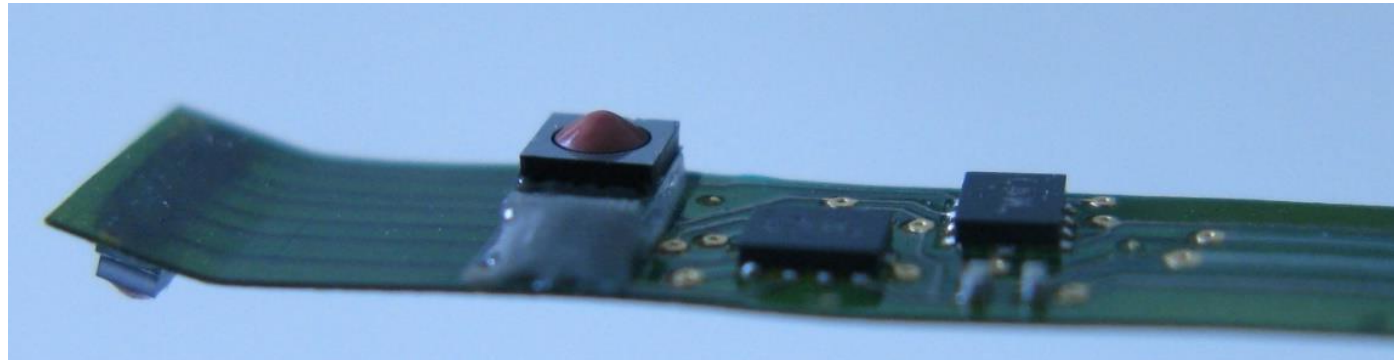
ADC konverterek



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS” LAPAROSZKÓP

Beültetett 3D
erőmérők

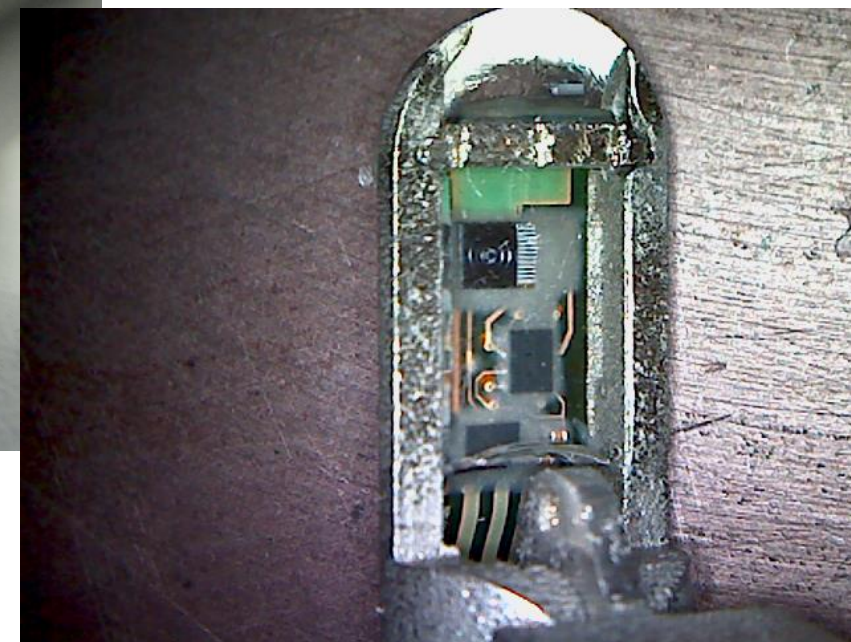
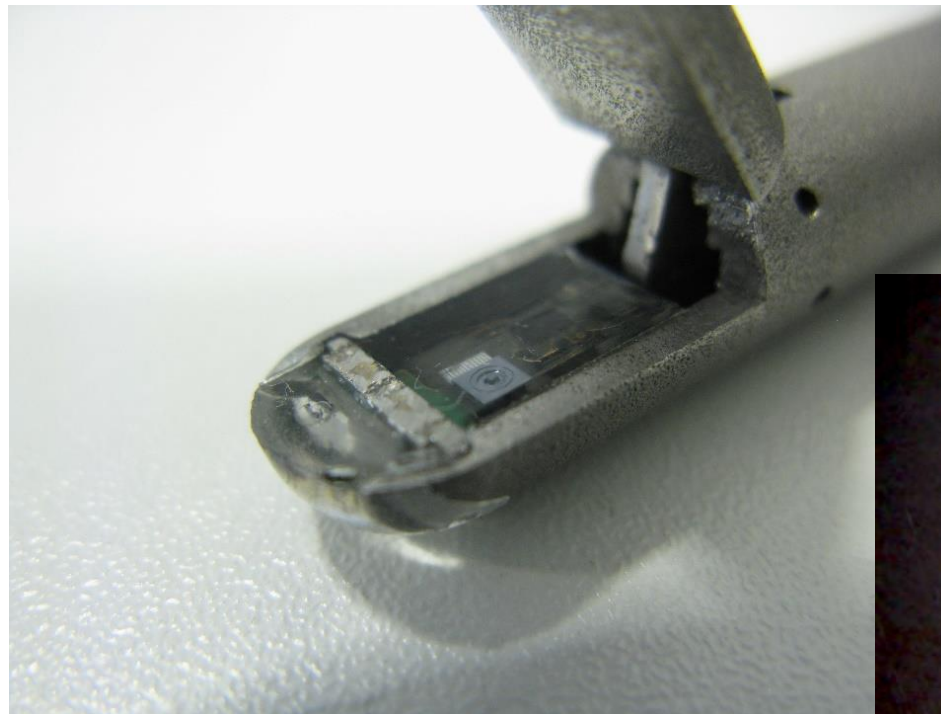


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS” LAPAROSZKÓP

Fém 3D
nyomtatott
csipesz

Biokompatibilis
bevonat



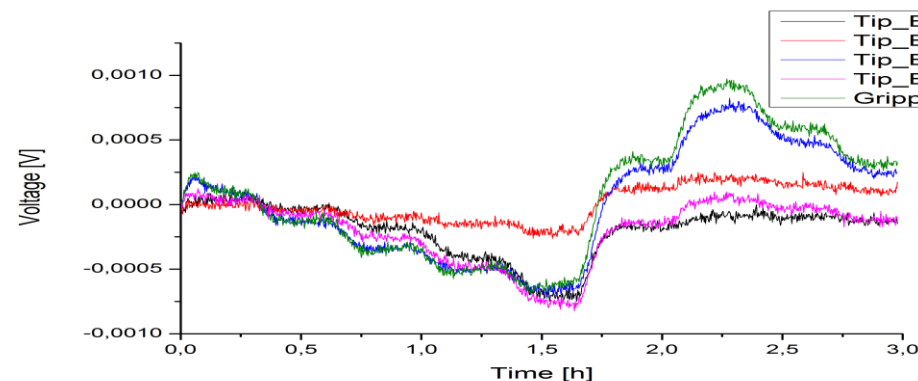
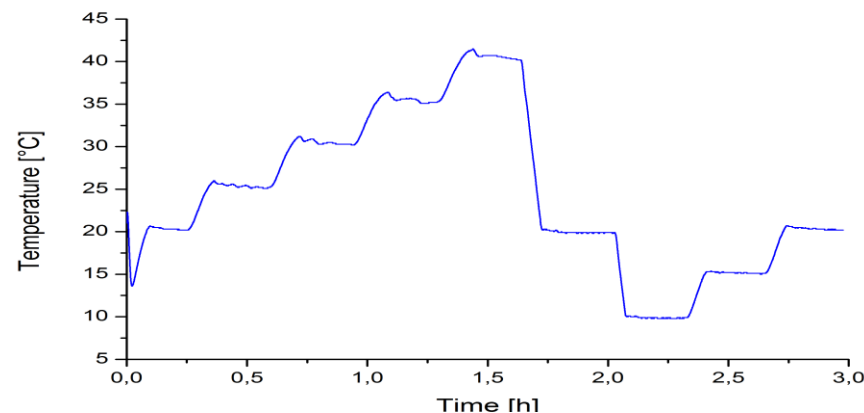
Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS”
LAPAROSZKÓP

Hőmérséklet teszt

Hőmérséklet profil

Válaszjelek

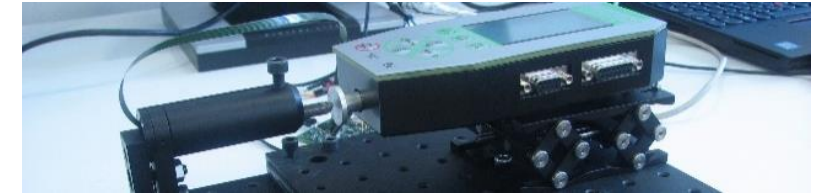
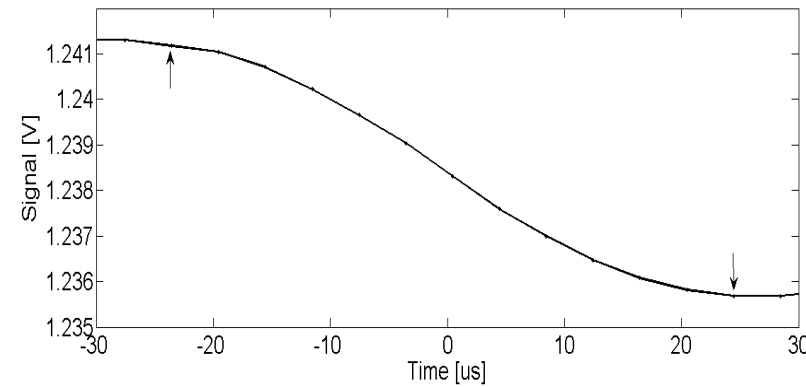


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

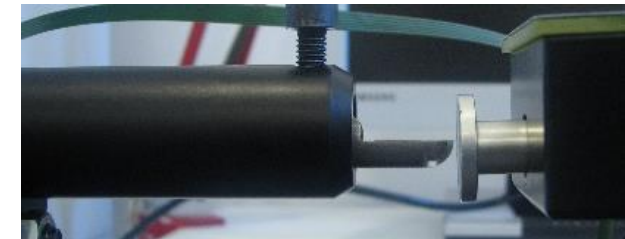
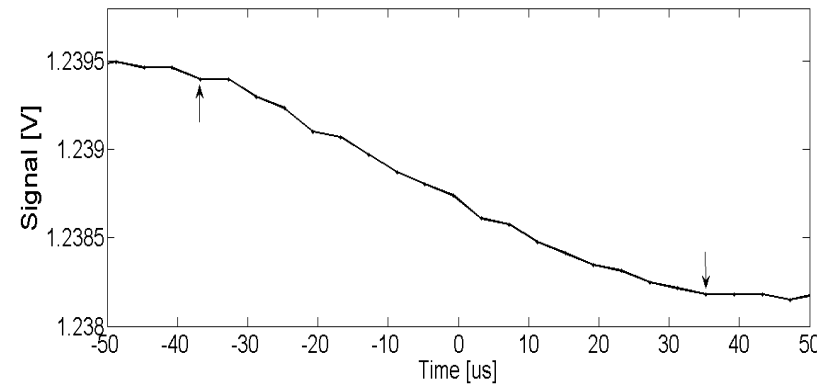
„OKOS”
LAPAROSZKÓP

Válaszidő

Bevonat nélkül



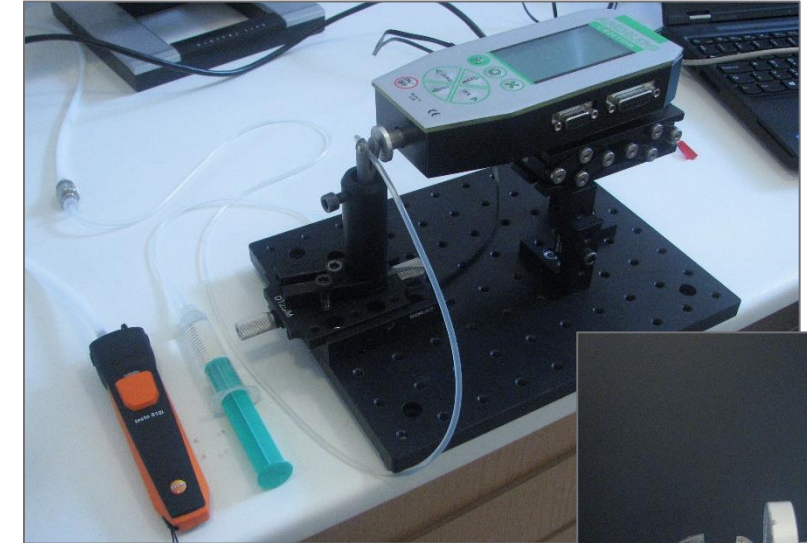
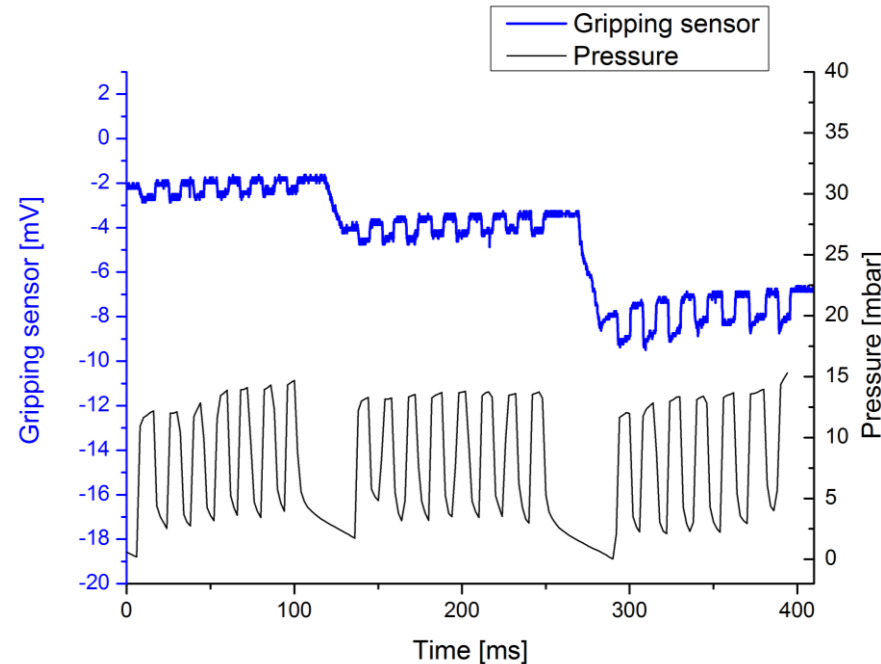
Bevonattal



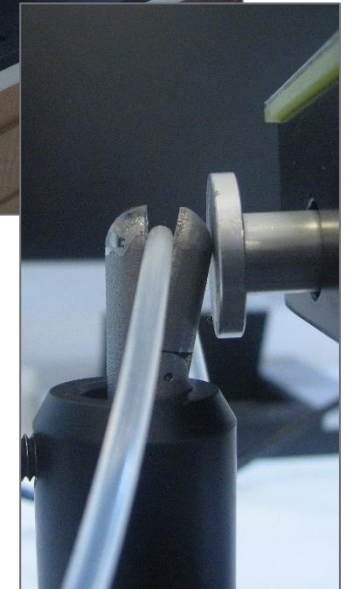
Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS”
LAPAROSZKÓP

Biomechanikai
tesztek



80 – 120Hgmm
106 – 160mBar



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

„OKOS”
LAPAROSZKÓP

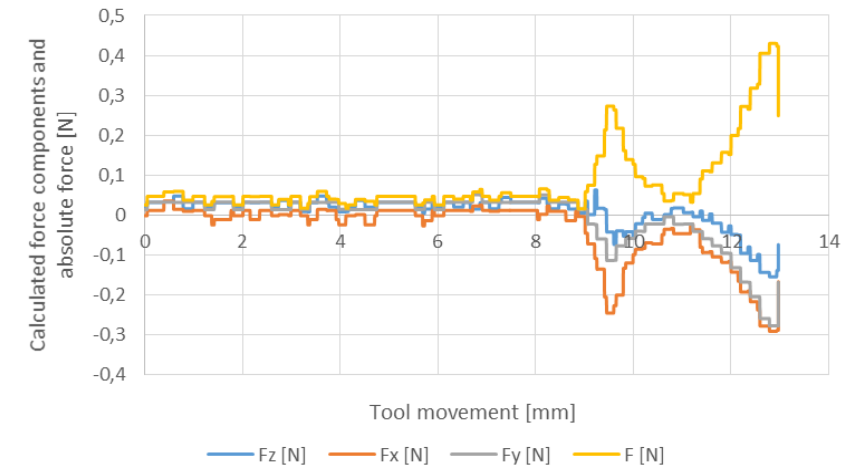
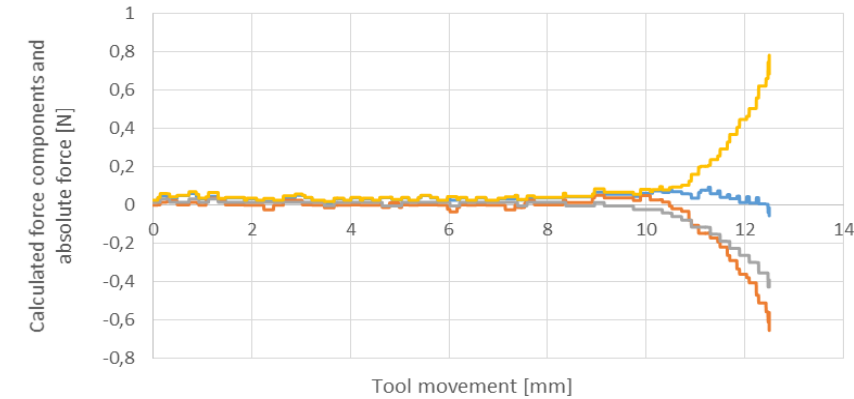
Biomechanikai
tesztek



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

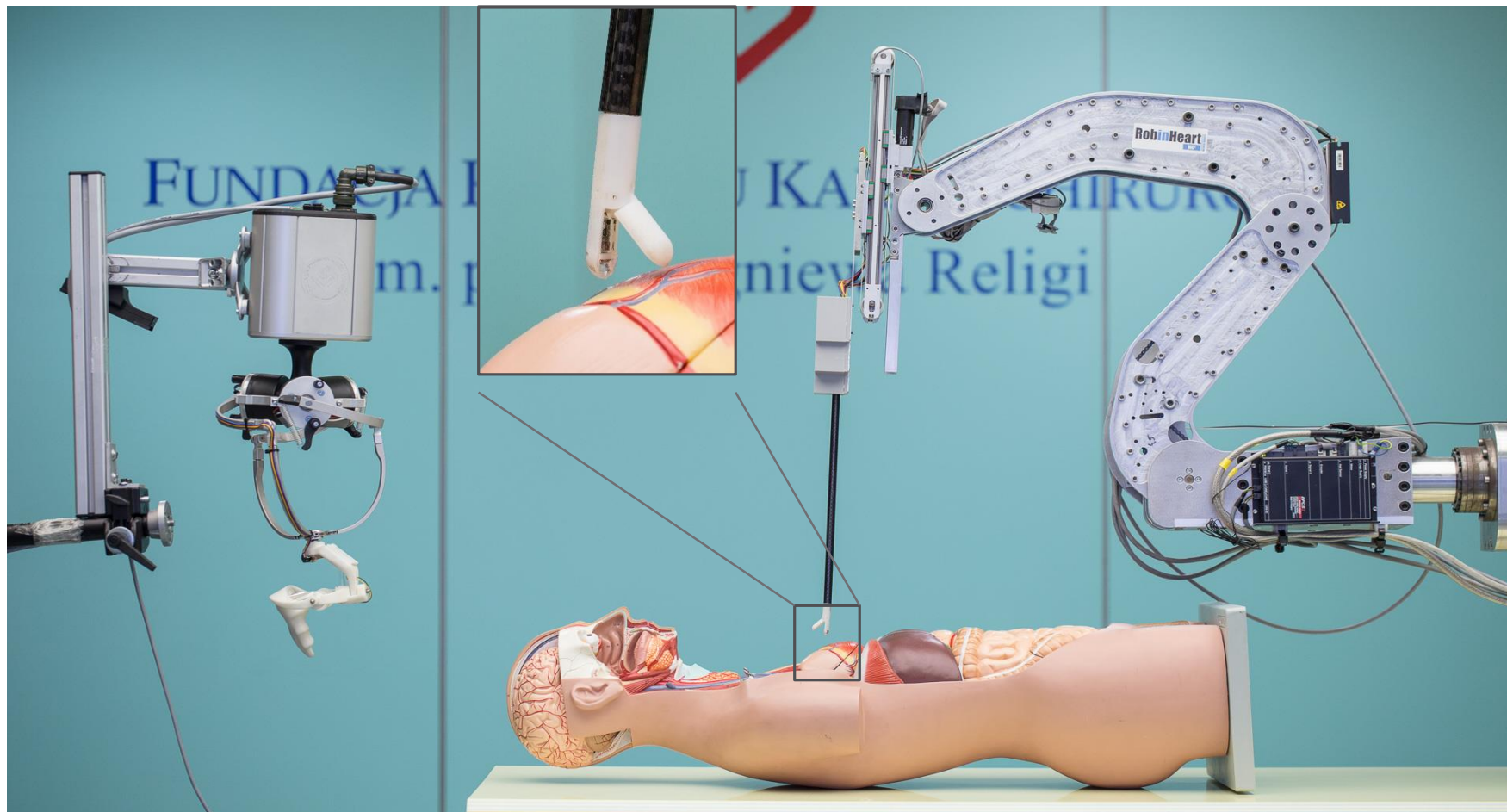
„OKOS”
LAPAROSZKÓP

Biomechanikai
tesztek



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

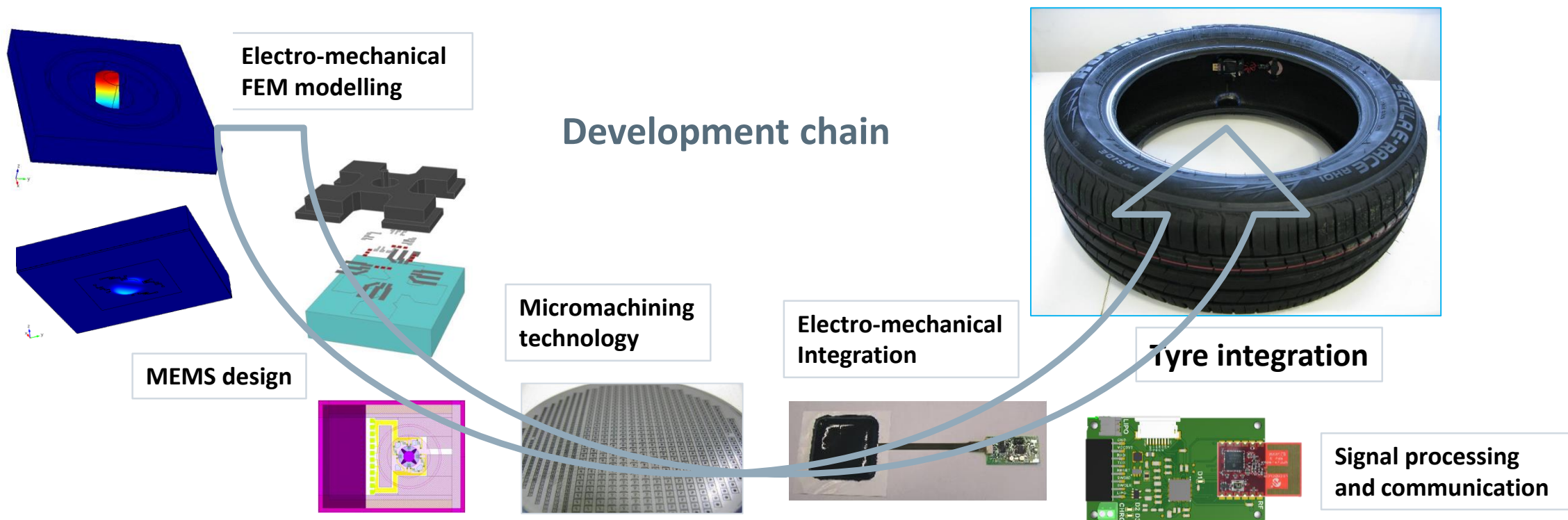
„OKOS”
LAPAROSZKÓP



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

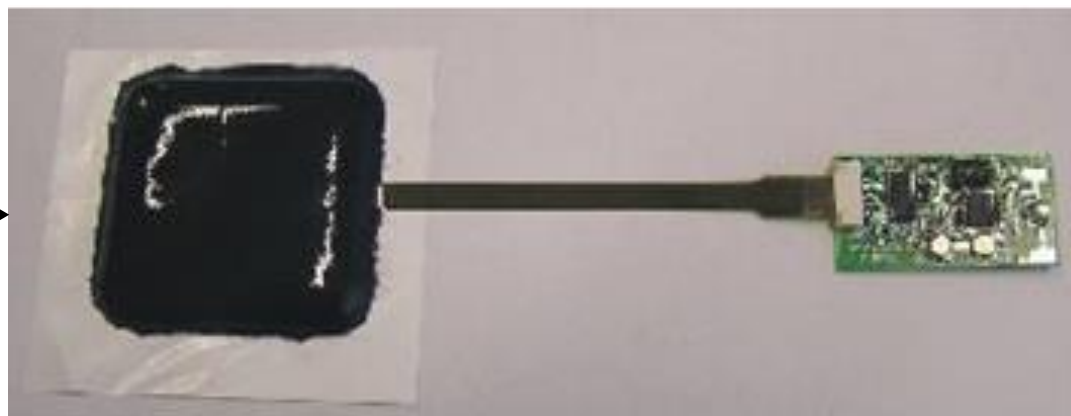
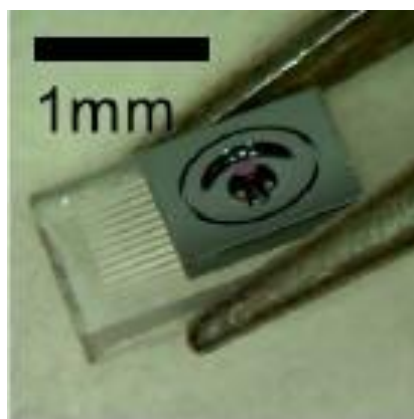
Cél: információgyűjtés a gumi és az útfelület között fellépő erőkről



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

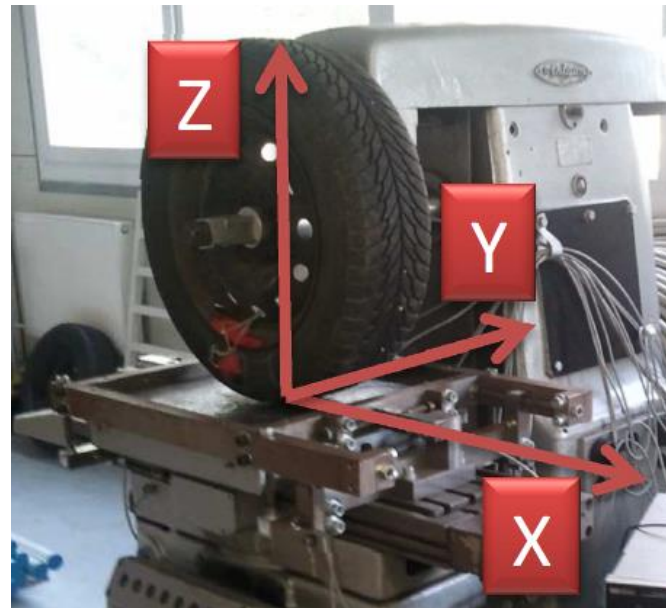
Teszt összeállítás



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

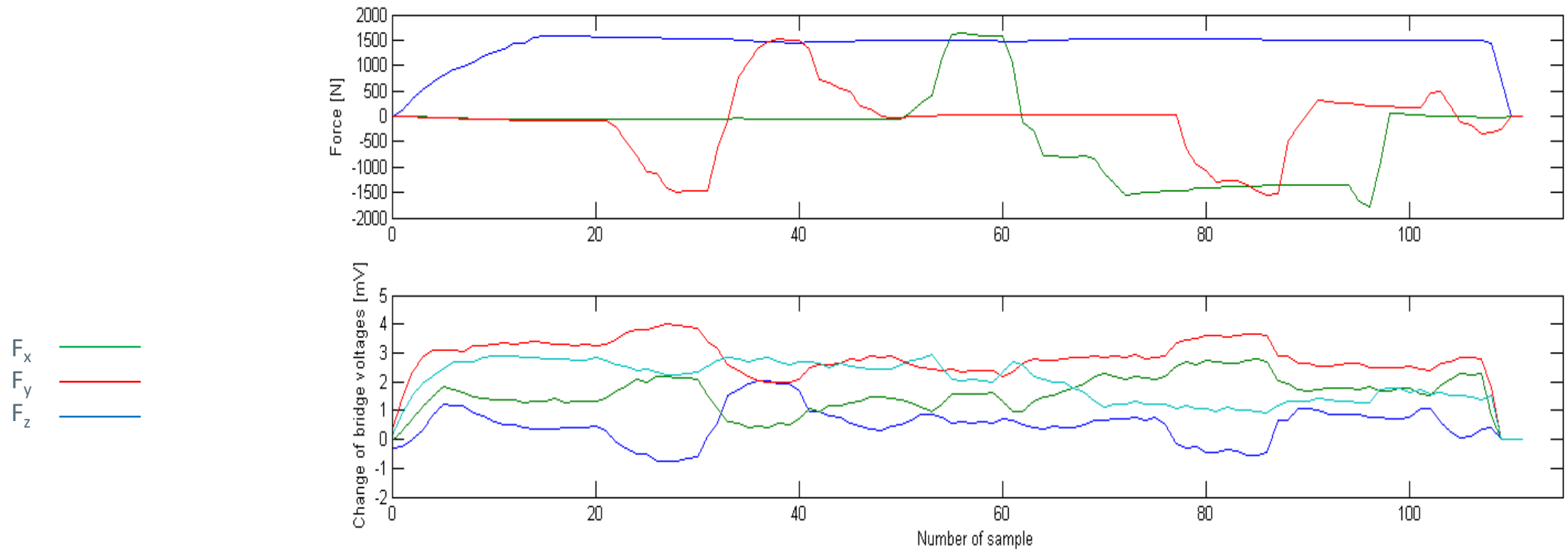
Mérésösszeállítás statikus mérésekhez



Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

Mérési eredmények

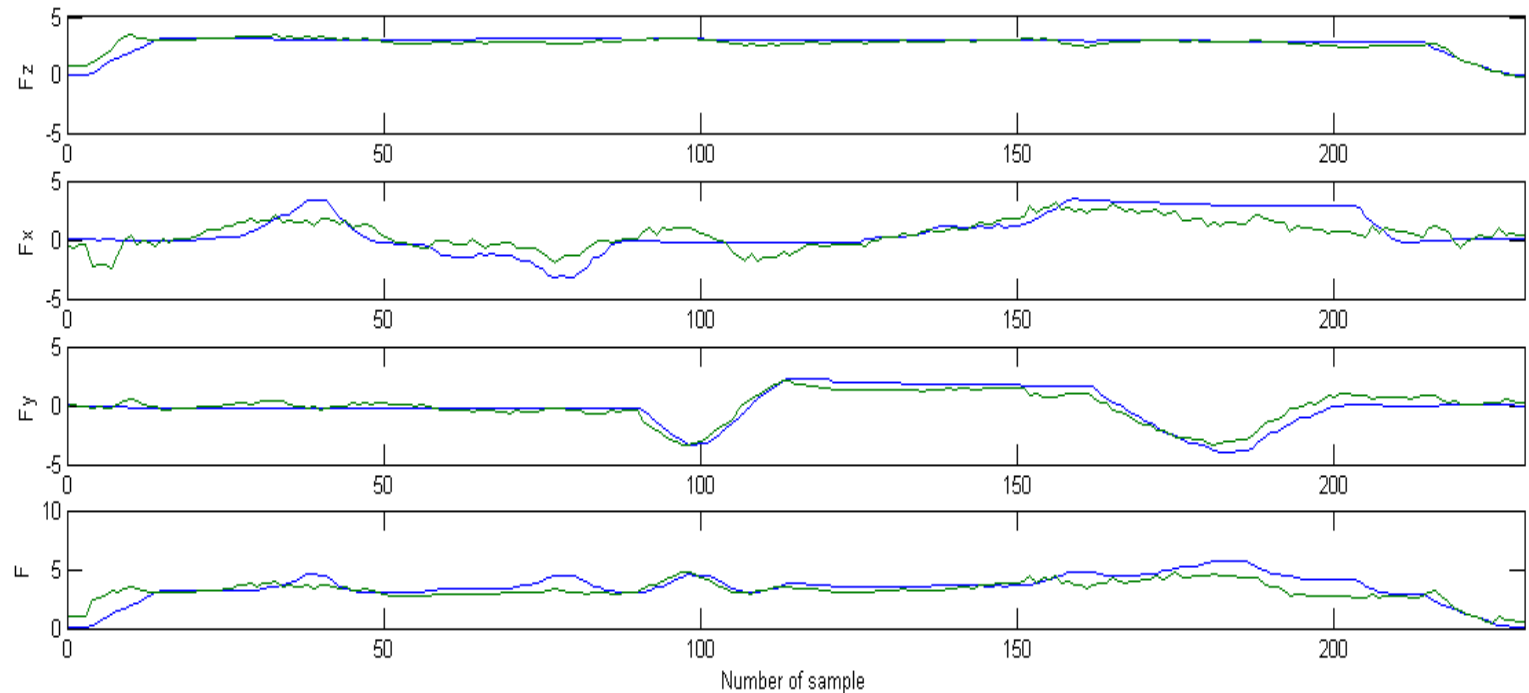


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

Többszörös regresszió számítással alátámasztottuk, hogy a szenzor kimenetén mérhető villamos jelek arányosak a gumi és az útburkolat között fellépő erőkkel

Calculated data —
Measured data —

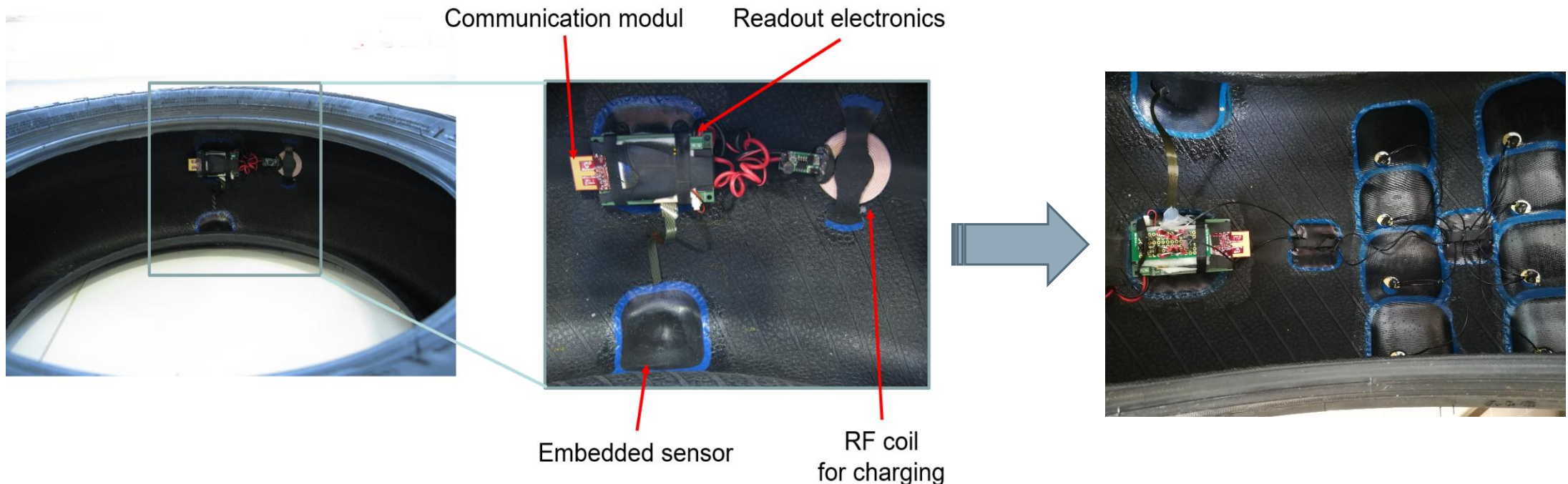


Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

- Vezeték nélküli kommunikáció
- RF töltés

Piezoelektromos zümmerek, mint
energy harvesterek



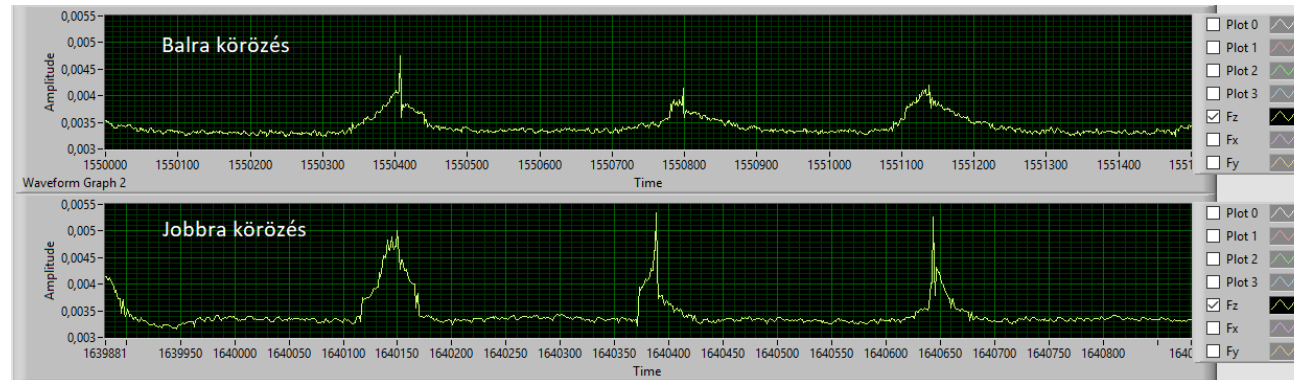
Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

Előzetes tesztek a KFKI
kampuszon



Out-of-balance voltage proportional to radial force component (F_x)



Out-of-balance voltage proportional to perpendicular force component (F_z)

Mikroerőmérők – piezorezisztív szenzorok – alkalmazások

GUMIDEFORMÁCIÓ SZENZOR

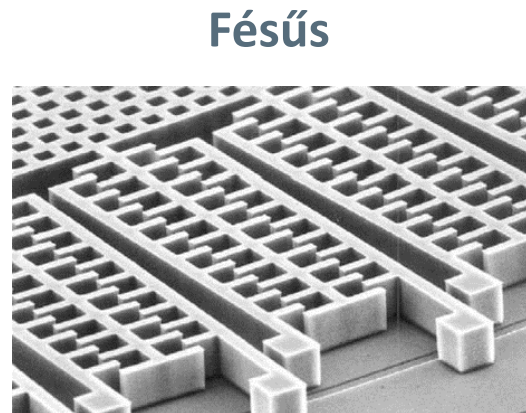
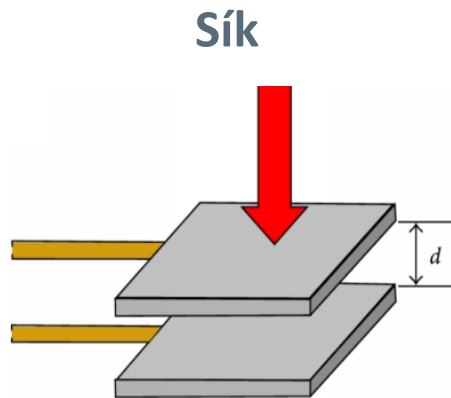


Mikroerőmérők – kapacitív szenzorok

Működési elv

Terhelés hatására egymáshoz képest elmozduló elektródák miatt a kapacitás változik.

Típusai



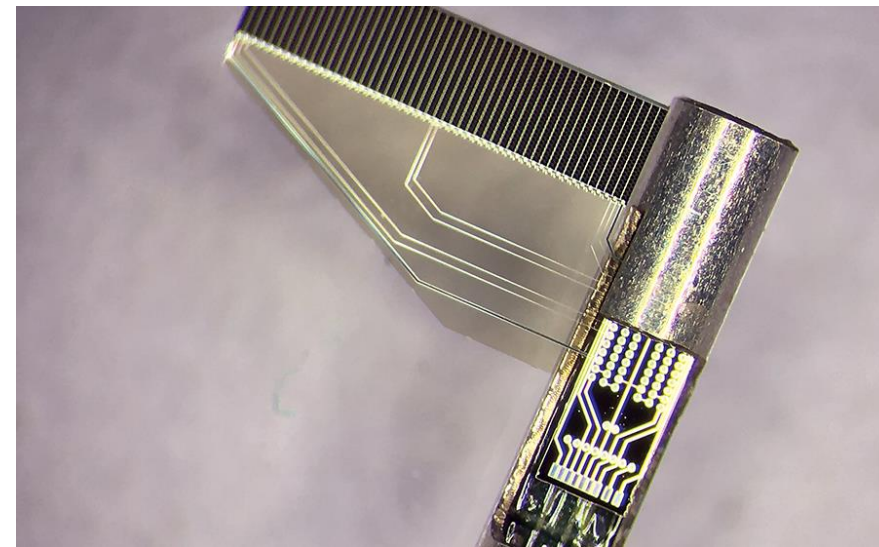
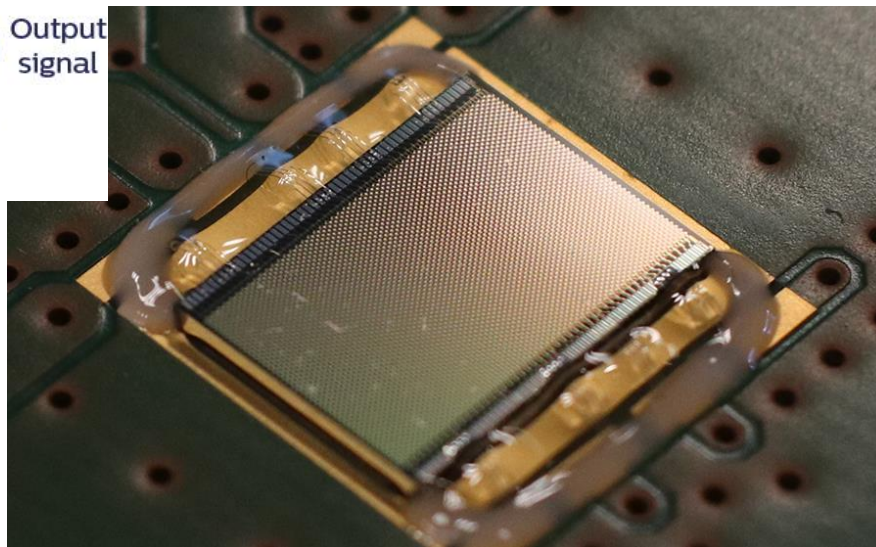
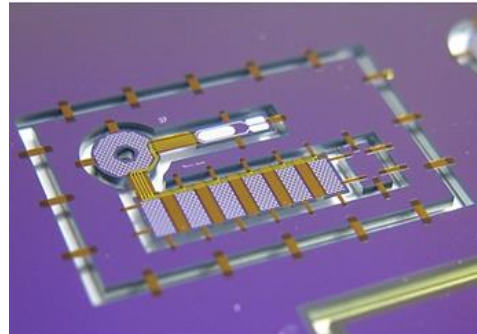
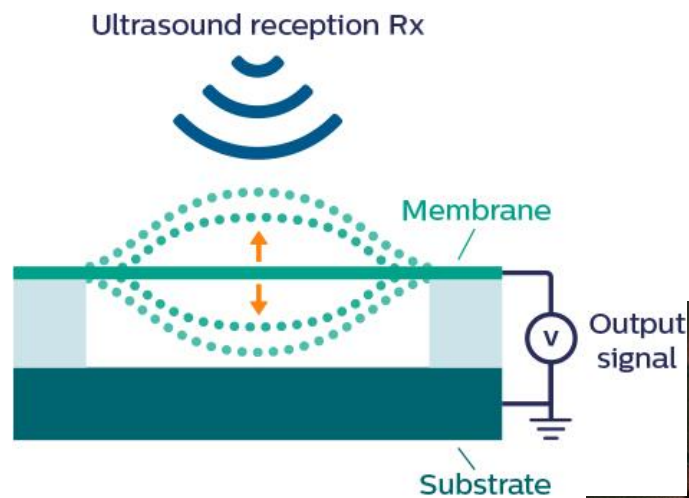
Előnyök:

- CMOS kompatibilitás
- Hosszú távú stabilitás
- Egyszerű kialakítás (sík)

Hátrányok:

- Kiolvasó elektronika bonyolult
- Nedvességre érzékenyek
- Szórt kapacitások
- Élhatás
- Relatív kicsi mérési tartomány

Mikroerőmérők – kapacitív szenzorok - alkalmazás



Nanoerőmérők – piezoelektromos szenzorok

Működési elv

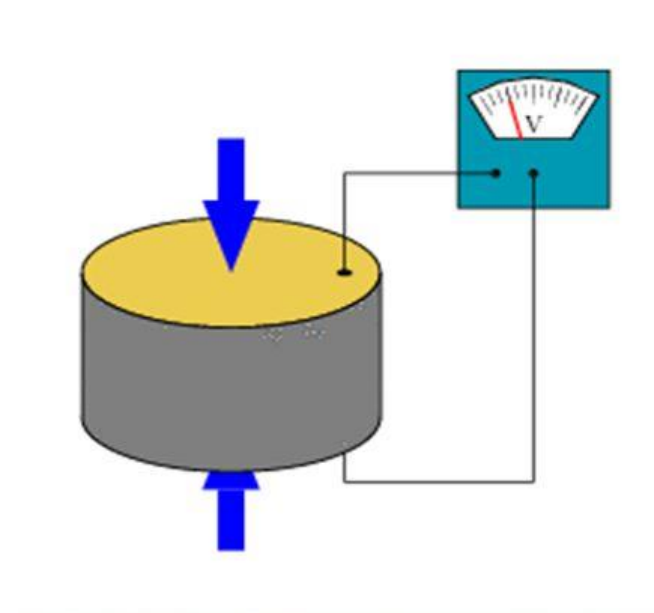
Mechanikai feszültség hatására a kristály egyes felületei között potenciálkülönbség alakul ki.

Előnyök:

- Nincs szükség külső táplálásra
- Gyors válaszidő

Hátrányok:

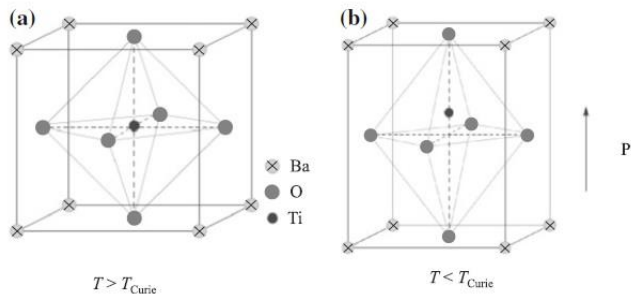
- Statikus erők mérése nehézkes
- Egyes anyagok beillesztése a MEMS technológiába nehézkes



Nanoerőmérők – piezoelektromos szenzorok

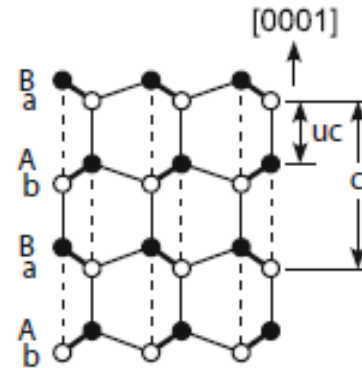
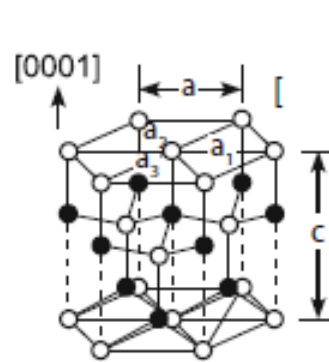
Leggyakrabban alkalmazott piezoelektromos anyagok

Poláros kristályok
(PZT, BaTiO₃)

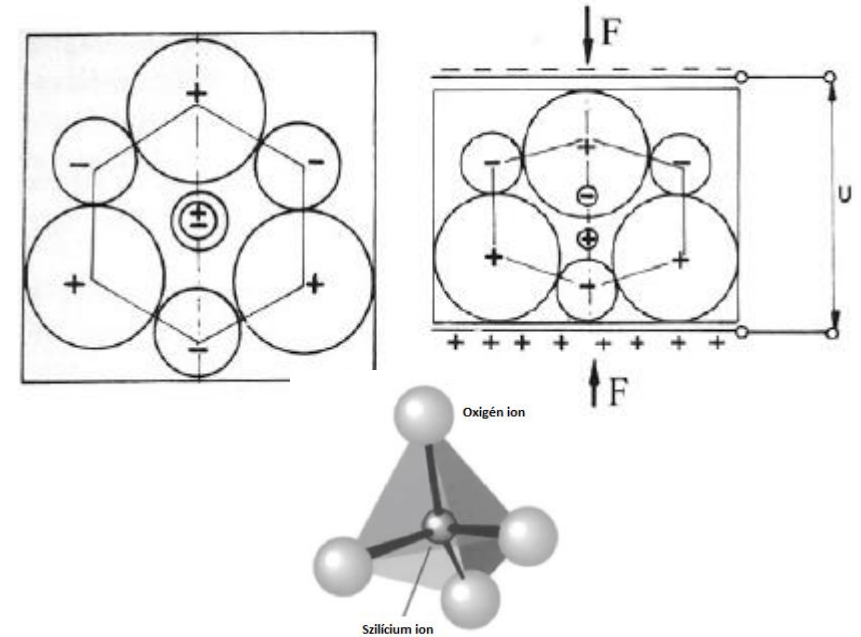


Polimerek
(PVDF)

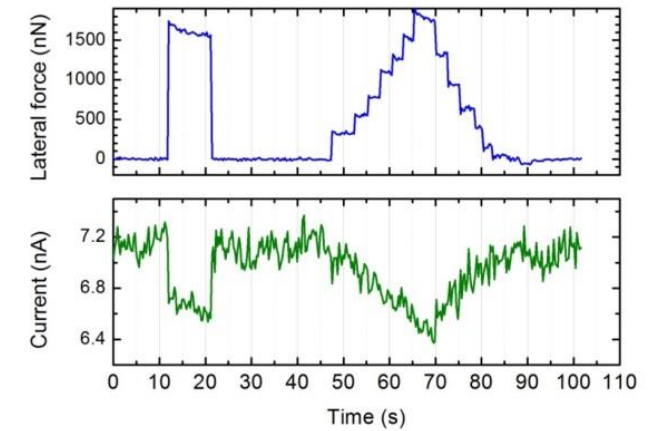
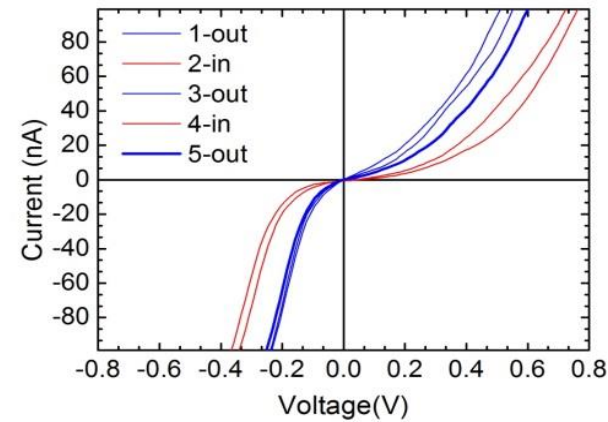
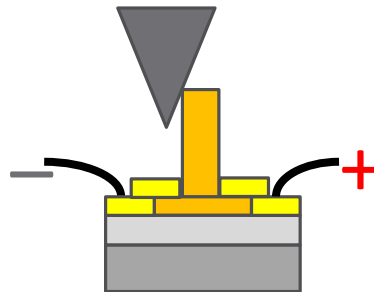
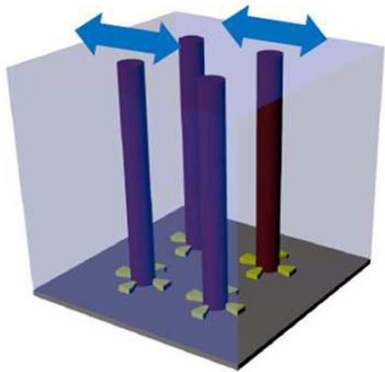
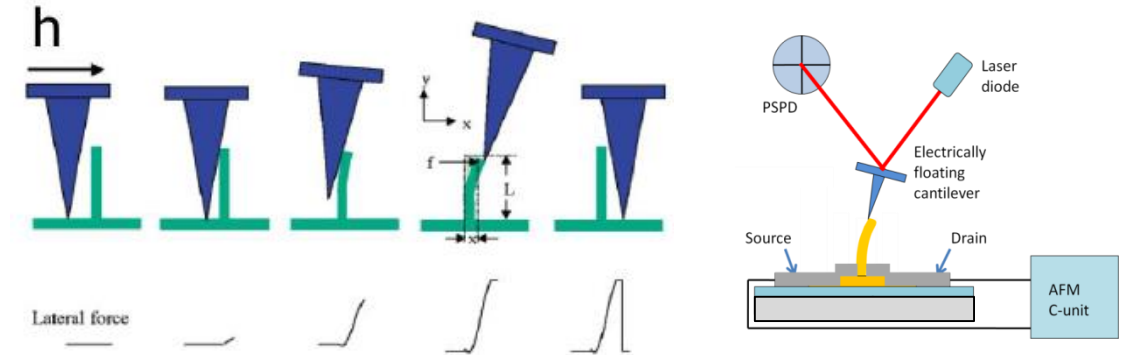
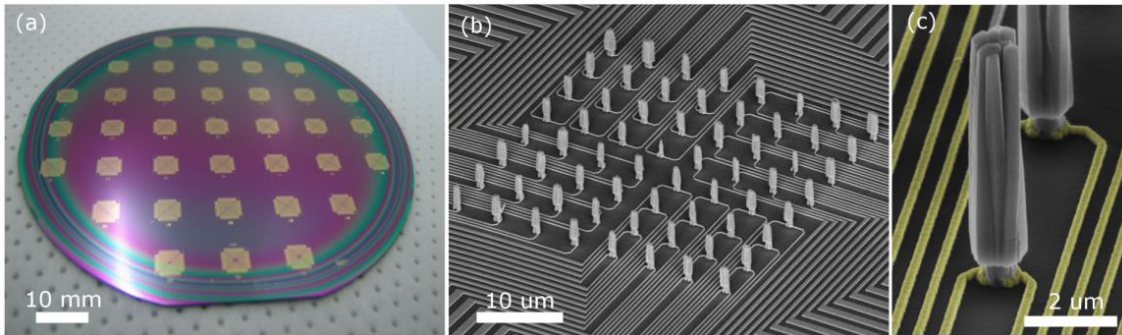
Wurtzit kristályok
(AlN, ZnO)



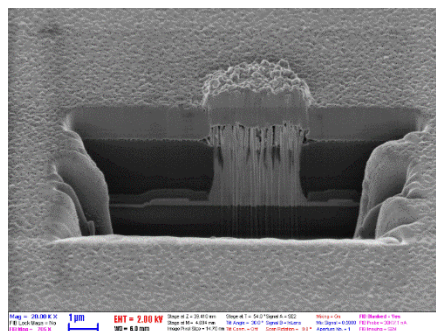
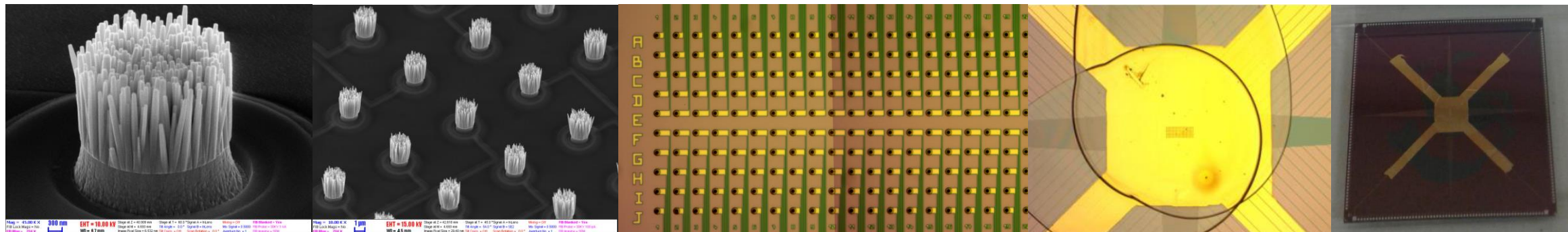
Apoláros kristályok
(kvarc)



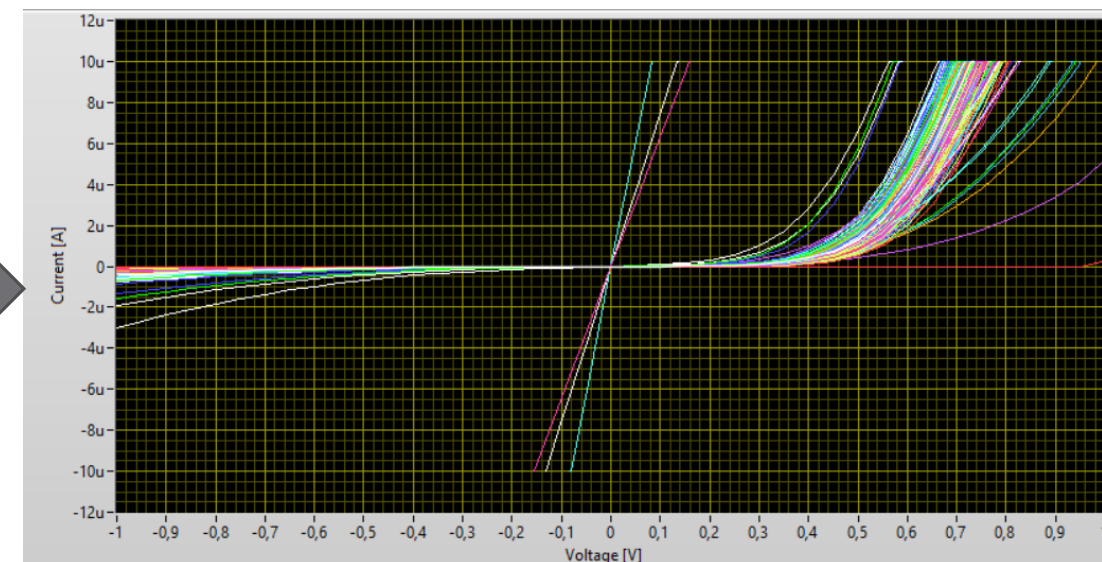
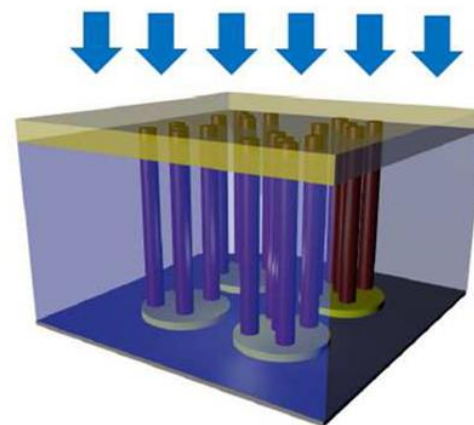
Nanoerőmérők – piezoelektromos szenzorok



Nanoerőmérők – piezoelektromos szenzorok - alkalmazások



Újlenyomat szenzor



Köszönöm a figyelmet!