MEMS eszközök és alkalmazásaik

Fürjes Péter

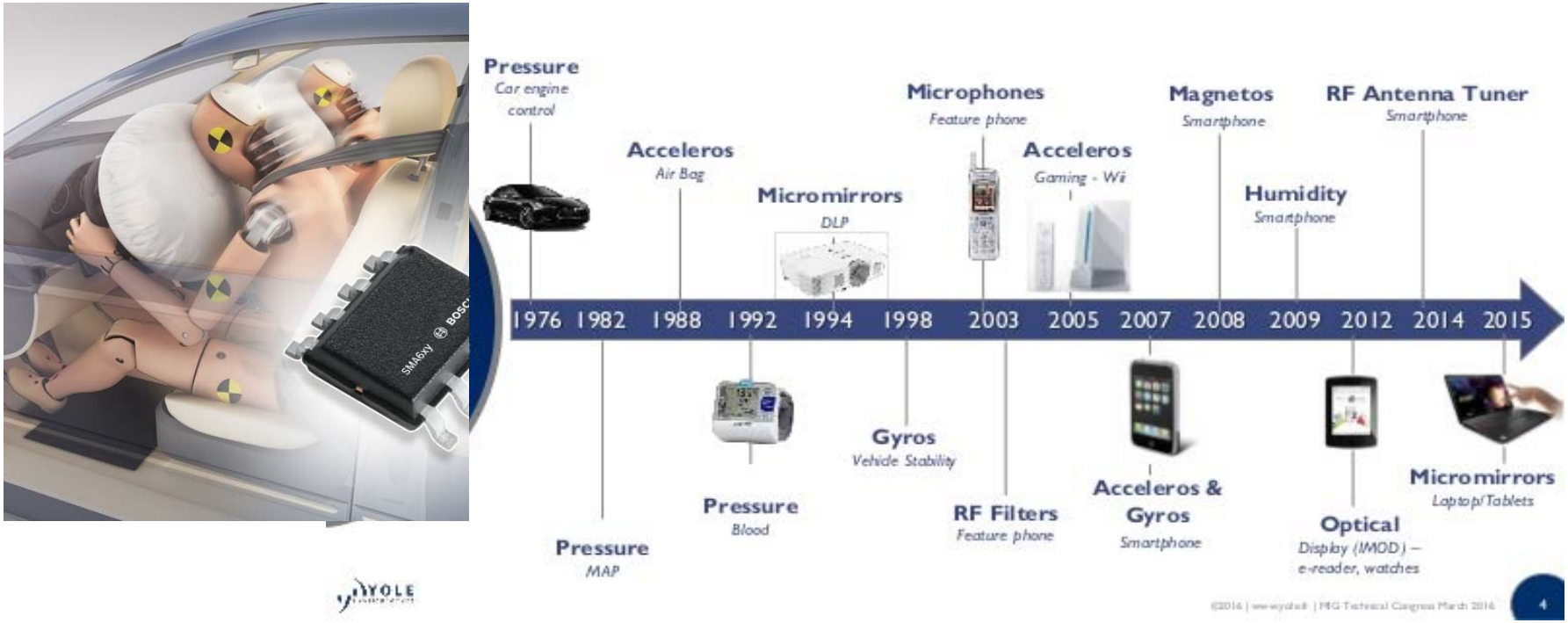
E-mail: furjes@mfa.kfki.hu, www.mems.hu

MEMS rendszerek forradalma: 90-es évek vége

MEMS/ MOEMS: Micro-(Opto-)ElectroMechanical Systems

„Amilyen mértékű fejlődést figyelhettünk meg a mikroelektronikában az elmúlt 20 évben, olyan fejlődés várható a MEMS területén a következő 20 évben”

(P. Rai-Choudhury - 1999)

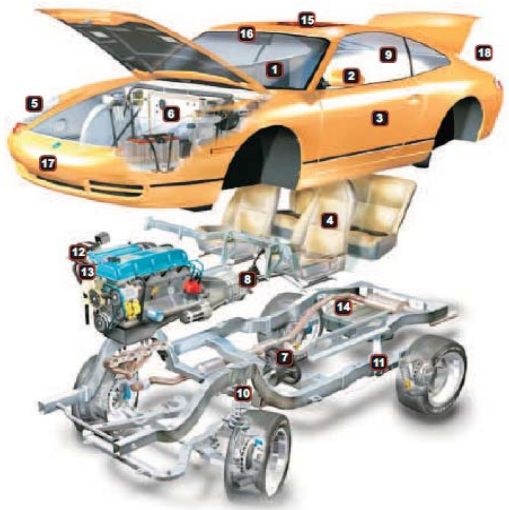


MEMS: érzékelők és beavatkozók

mikro-elektromechanikai rendszerek

Példa: autóipari alkalmazás

- Motor / sebességváltó diagnosztika és kontrol
- Élet- és közlekedésbiztonság
- Komfort



1 - Headlamp levelling control / Interior Ligting controls / Infotainment controls / Instrument panel dimming controls / Traction control / HVAC controls / Airbag enable-disable / Tachograph mode switch / Navigation system function select
2.- Mirror memory
3.- Door position sensor
4.- Seat:
· Seat heating control
· Recliner position sensor
· Head restraint position sensor
· Lumbar position sensor
· Seat memory position sensor (linear & rotary)
5.- Headlamp levelling sensor / Adaptive frontlighting
6.- HVAC air flap position sensor
7.- Windshield wiper delay control / Steering angle position sensor
8.- Gear select position sensor
9.- Window position sensor
10.- Pedal position sensor
11.- Suspension & chassis height
12.- Throttle position / air-intake valve
13.- Swirl system / EGR
14.- Liquid level sensor
15.- Power sunroof control / Convertible hood control
16.- Rear-view mirror actuator feedback sensor
17.- Anti-collision radar
18.- Anti-pinch sensor / Aided parking

Mikrorendszerek előnyei:

- nagy rendszer-változások vezérlése kis mértékű behatásokkal,
- új működési elvek realizálása,
- minőségi előnyök a méretcsökkentés révén,
- tetszőleges funkciók társítása:
  érzékelés, számítás, aktuálás (beavatkozás), vezérlés és kommunikáció,
- az ezeket megvalósító eszközök integrálása egy rendszerben,

- alapvetően felületi-, rétegtechnológiai realizálás,
- csoportos (batch) megmunkálás,
- a MEMS eszköz árképzése: a chip 0,1-50%, a tokozás 50-99%.

MEMS szenzorok a telefonokban

2007
IPHONE

- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2008/09
IPHONE 3

- Magnetométer

- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2010/11
IPHONE 4

- Giroszkóp
- MEMS mikrofon
- RGB / Proximity COMBO
- Magnetométer

- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2012/13
IPHONE 5

Szenzor Hub:

- Ujjjlenyomat

- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon

- Gyorsulásmérő
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

2014
IPHONE 6

Szenzor Hub:

- Nyomás
- 6 „tengelyű” giroszkóp

- Ujjlenyomat

- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon

- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

MEMS szenzorok a telefonokban

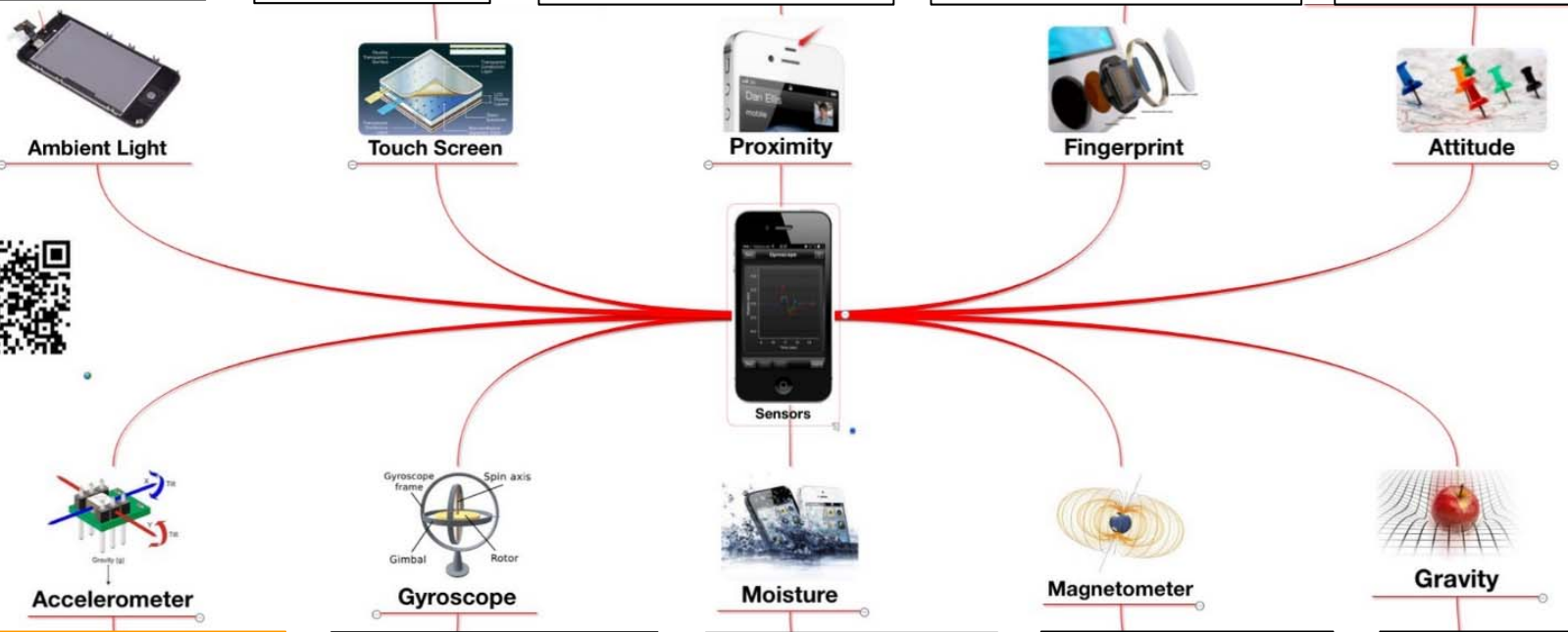
Környezeti világítás: a képernyő fényerejének beállításához (akku élettartam)

Érintőképernyő: érintés helyinformáció a processzor számára

Proximity: Telefon távolságát méri a felhasználó arcától. Kikapcsolja a billentyűzetet telefonálás közben.

Ujjlenyomat: A HOME gombba épített (ami zafír borítású) kapacitív szenzor 500ppi felbontással.

Rotáció szenzor (a normál horizonthoz képest): a GIRO adataiból.



Gyorsulásérzékelő: Az eszköz gyorsulását méri 3 tengely irányában (pl. gravitáció). MEMS eszköz.

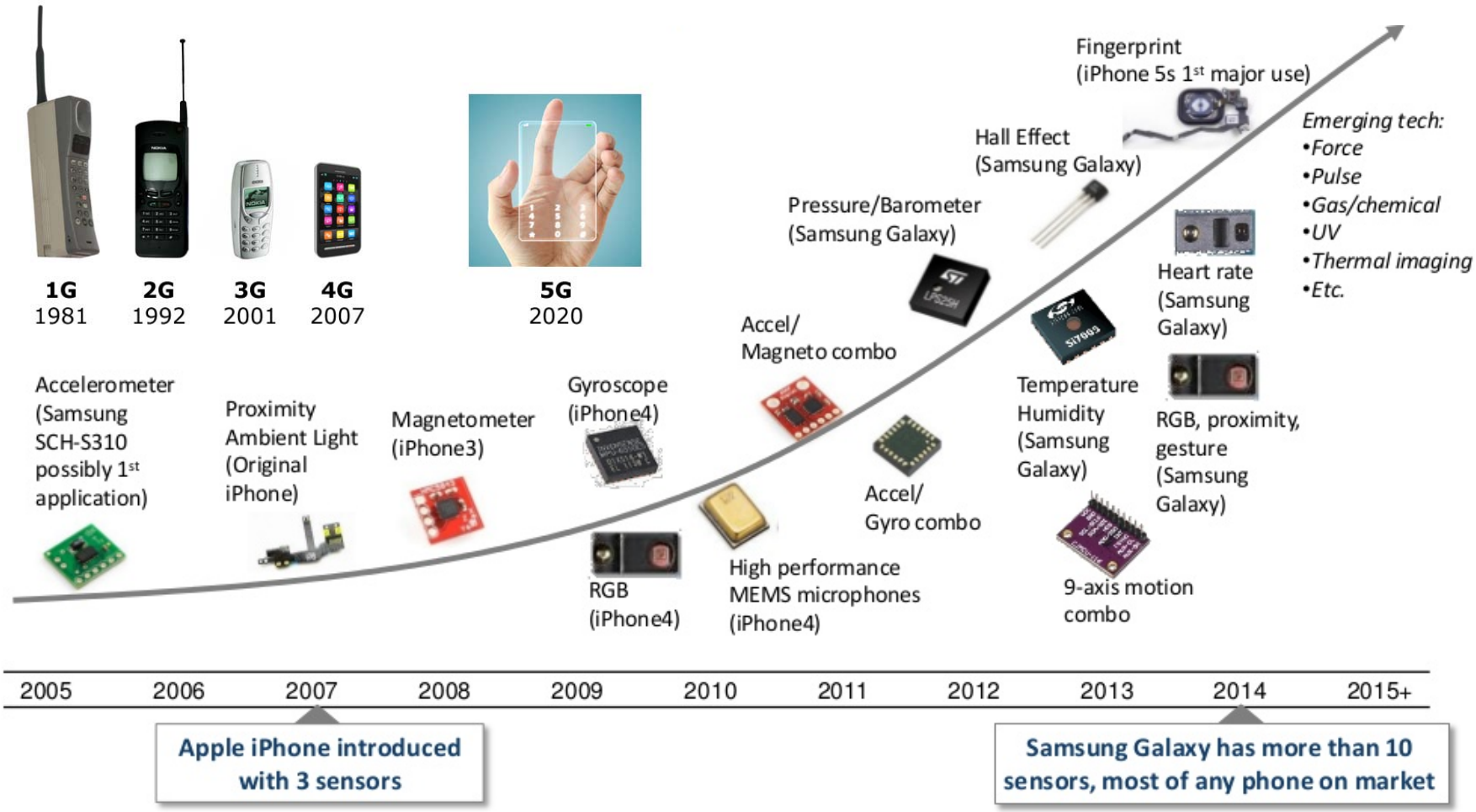
GIROszkóp: a forgási sebességet méri a különböző tengelyek körül. MEMS eszköz.

Nedvesség:

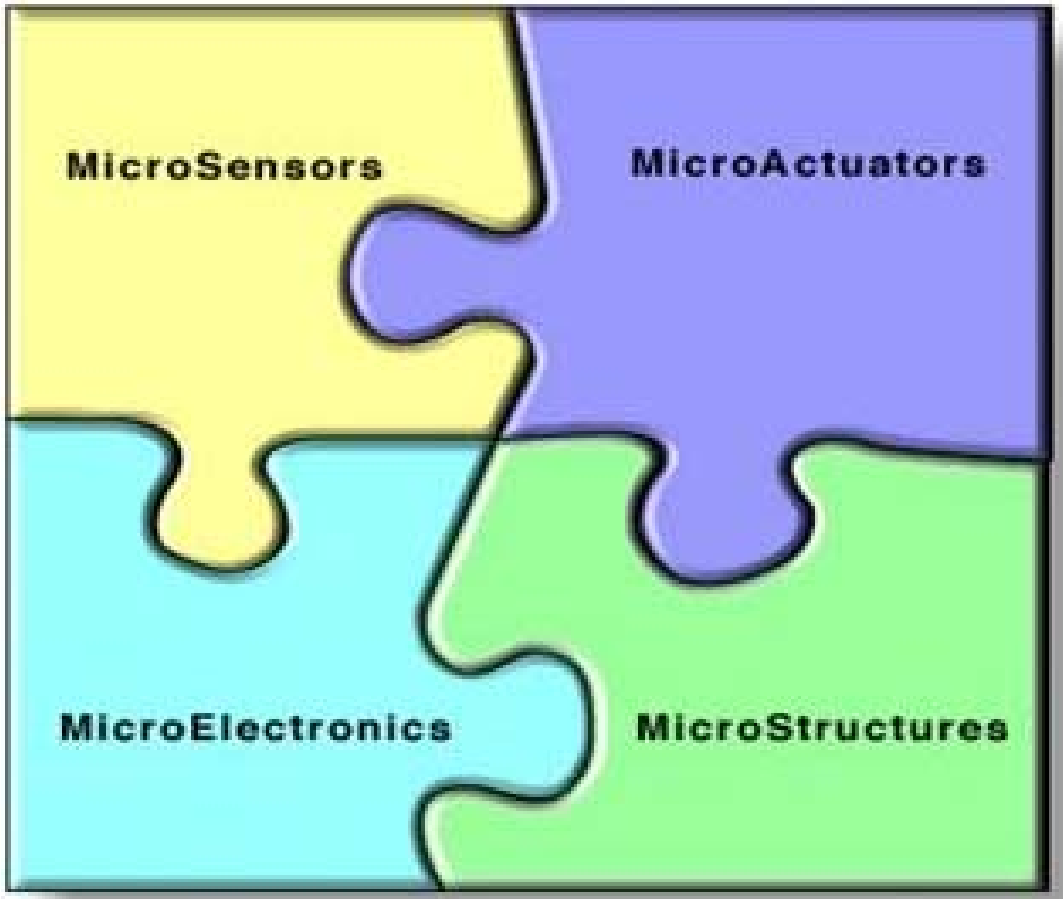
Magnetométer: a Föld mágneses terét méri 3 merőleges irány mentén.

Gravitáció: a garvitáció irányát méri a 3D gyorsulásérzékelő szenzor adatai alapján.

MEMS szenzorok a telefonokban



MEMS: alkalmazások szerint



Fizikai:

- Mechanikai szenzorok
- Akusztikai eszközök
- RF MEMS
- Optikai eszközök
- Mikrofluidika

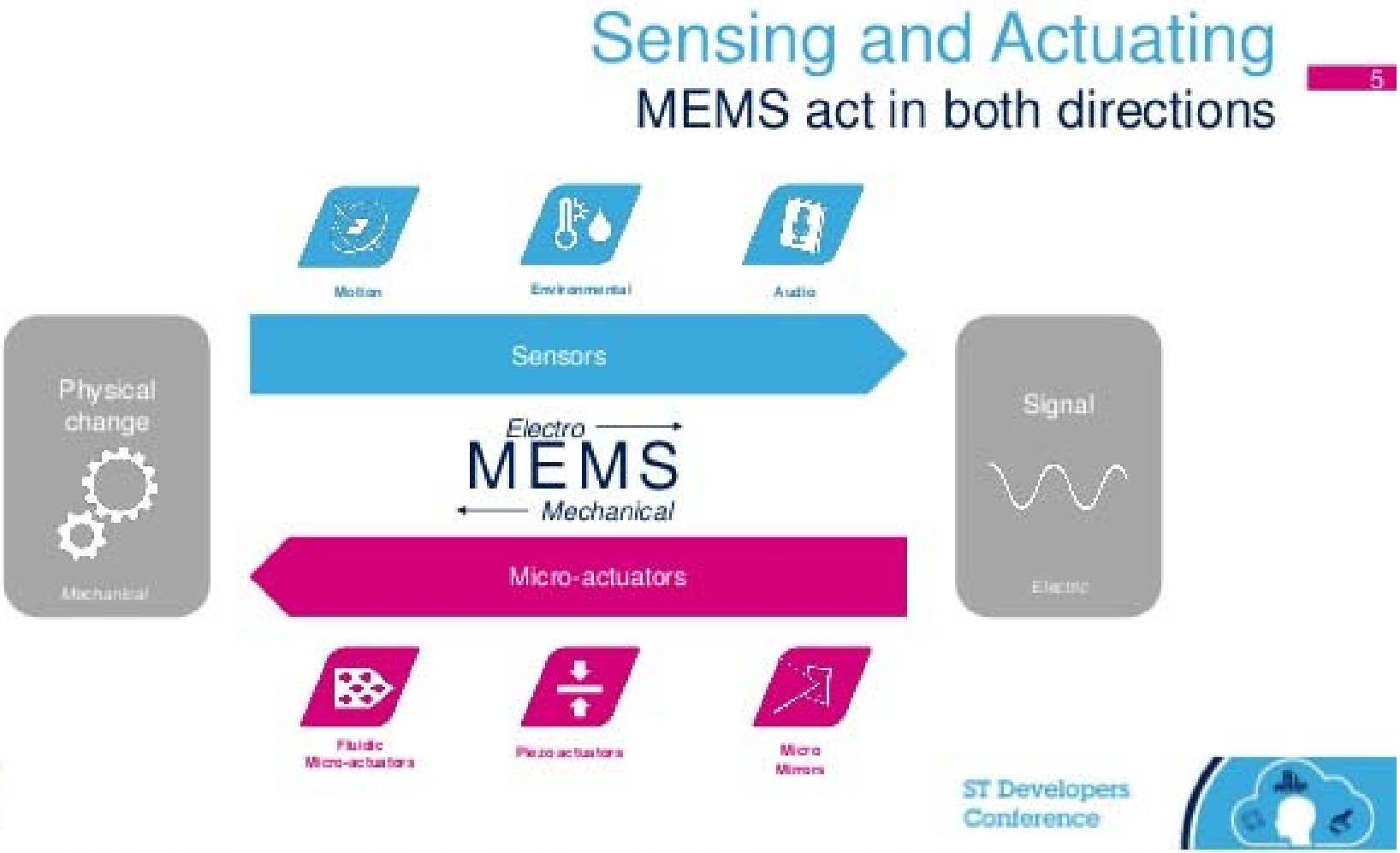
Kémiai:

- Gáz és kémiai szenzorok
- Mikrofluidika (uTAS)
- Üzemanyagcellák

Biológiai:

- Orvosdiagnosztikai szenzorok
- Mikrofluidika
- Implantátumok
- Mikrosebészeti eszközök
- Szerv-mérnökség

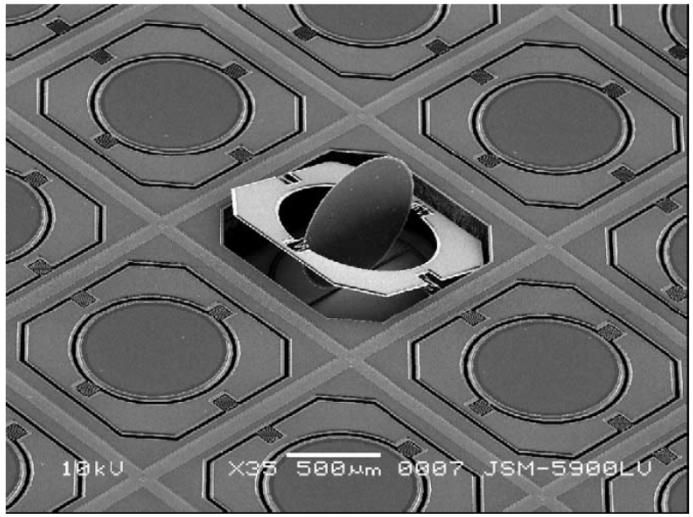
MEMS: érzékelők és beavatkozók

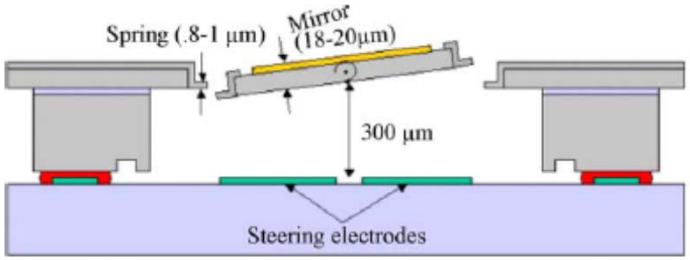


MEMS: BEAVATKOZÓK

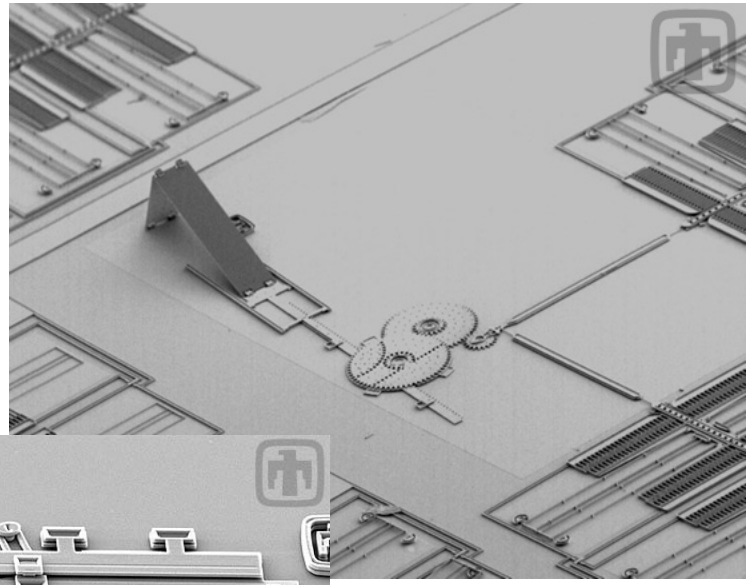
MEMS: beavatkozók

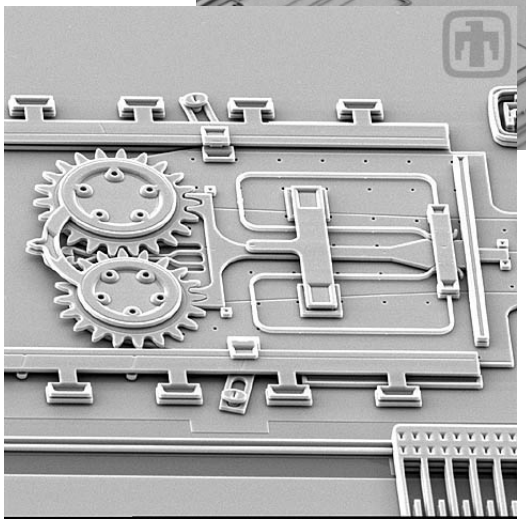
Példa: kapcsolók, tükrök, motorok, szelepek



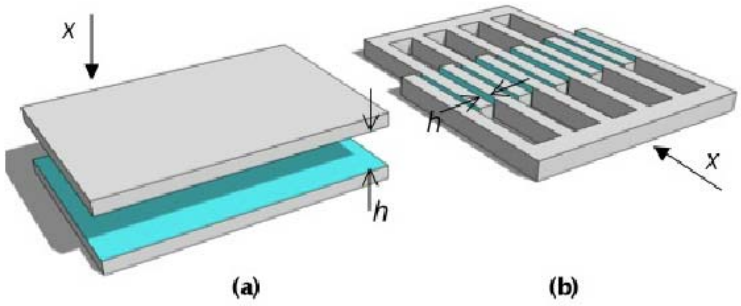


Kurdle (2005) Sensors and Actuators



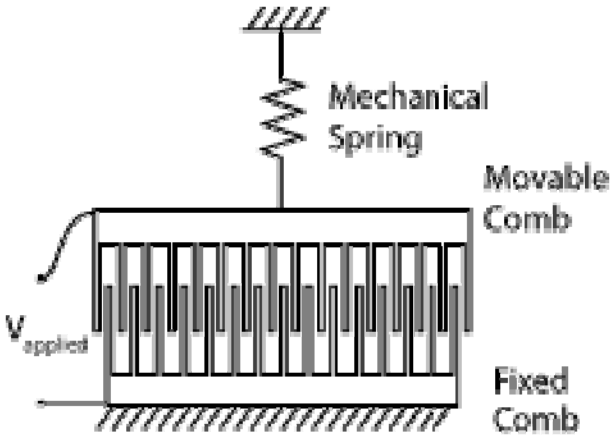


MEMS: beavatkozók



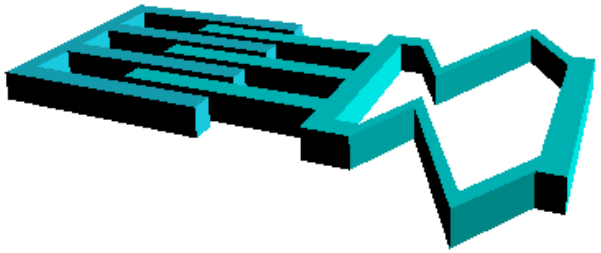
Működési elvek:

- **Elektrosztatikus:** elektrosztatikus kölcsönhatás ellenkezőleg töltött vezető felületek között
- **Termikus:** a hőtágulási jelenségek kihasználása
- **Mágneses:** mágneses erőhatások alkalmazása: pl. állandó mágnesek, külső mágneses mező, ferromágneses fémek, elektromágnesek

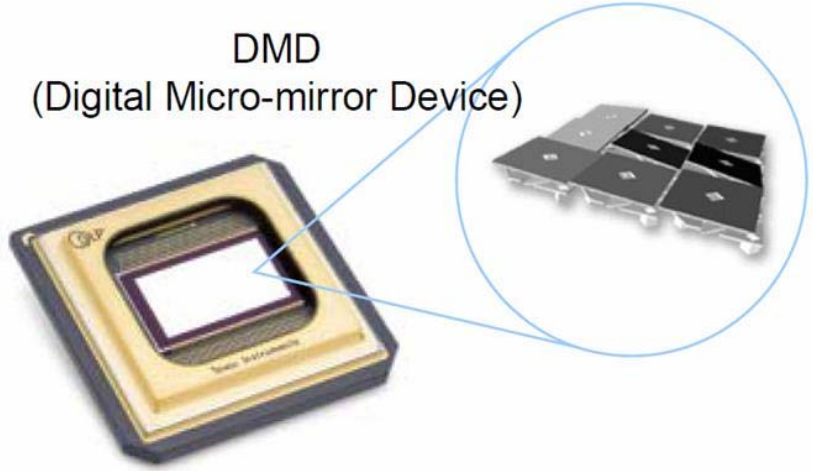


Elmozdulás szerint:

- Transzlációs
- Rotációs

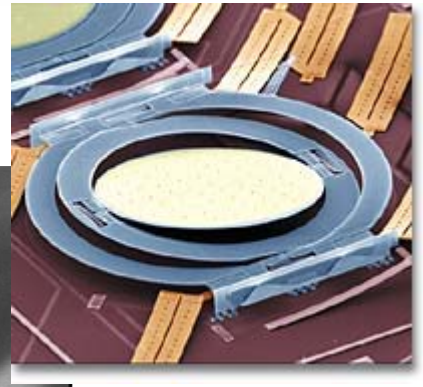


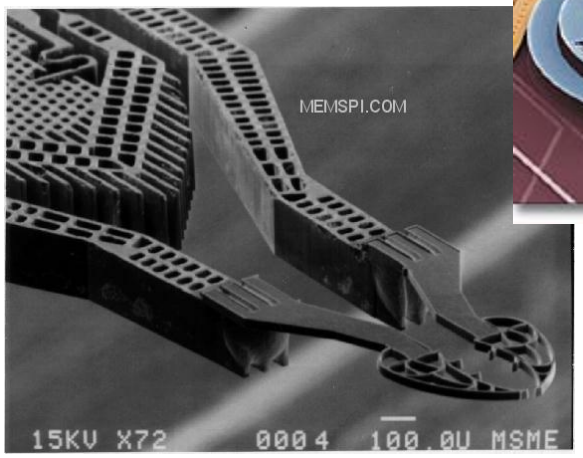
MEMS: beavatkozók



Alkalmazások:

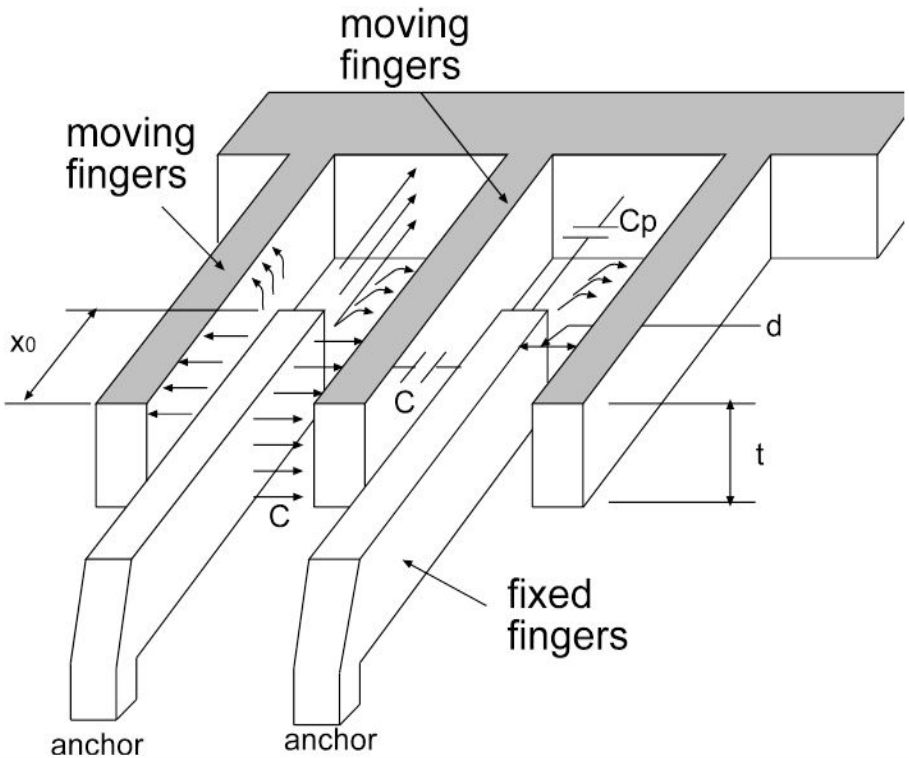
- **Digitális mikro-tükör Eszközök (DMD):** DLP technológiát alkalmazó projektorokban
  - mikro-tükör hálózat (néhányszor 100e)
  - önálló mikro-szkenner-tükör
- **Optikai kapcsolók:** kapcsolók és illesztők adat kommunikációs technológiákban
- **Folyadékmozgatás:** pl. mikro hűtés
- **Mikro-sebészeti eszközök**
- Adatírás vagy olvasás
- RF jellimitálás

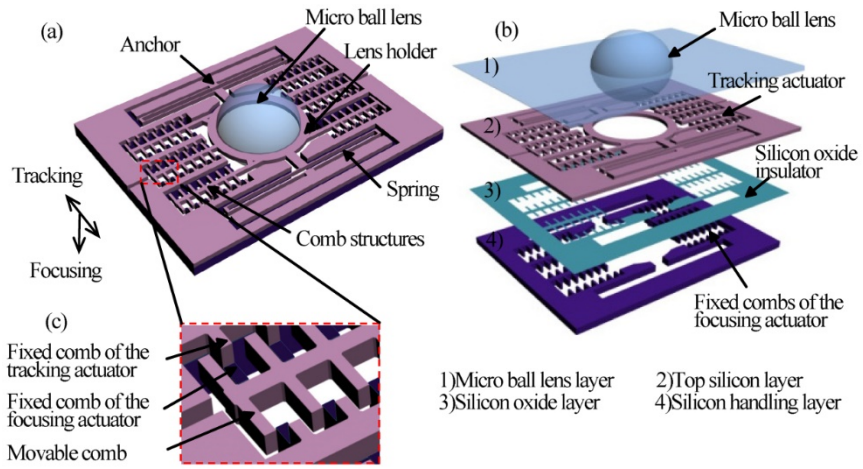


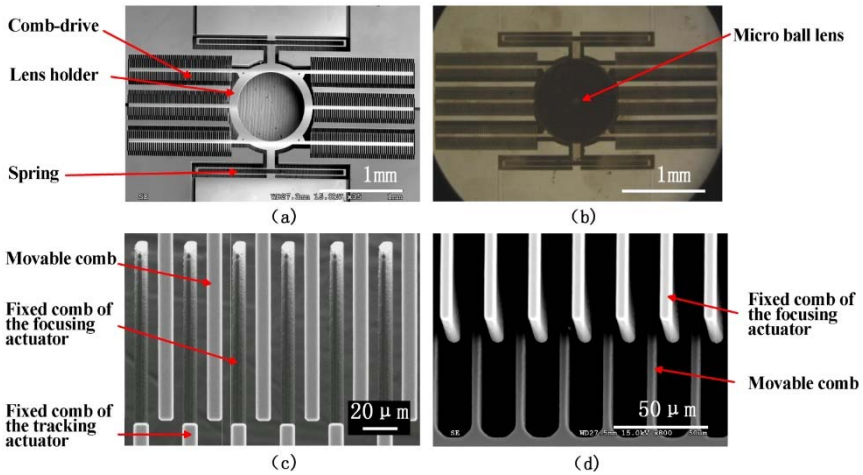


MEMS: beavatkozók

Elektrosztatikus aktuálás: COMB DRIVE





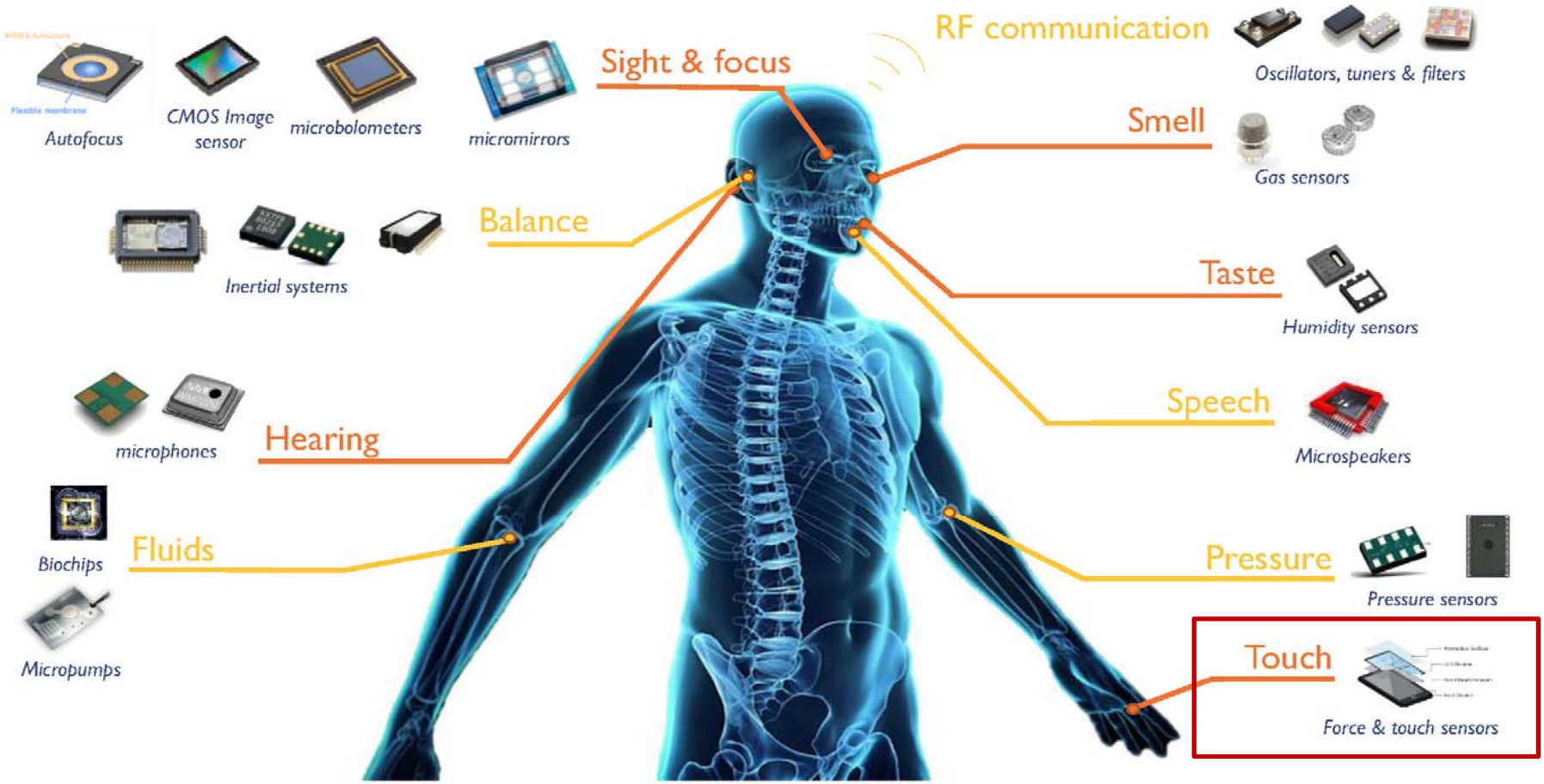


Optics Express Vol. 20, Issue 1, pp. 627-634 (2012)

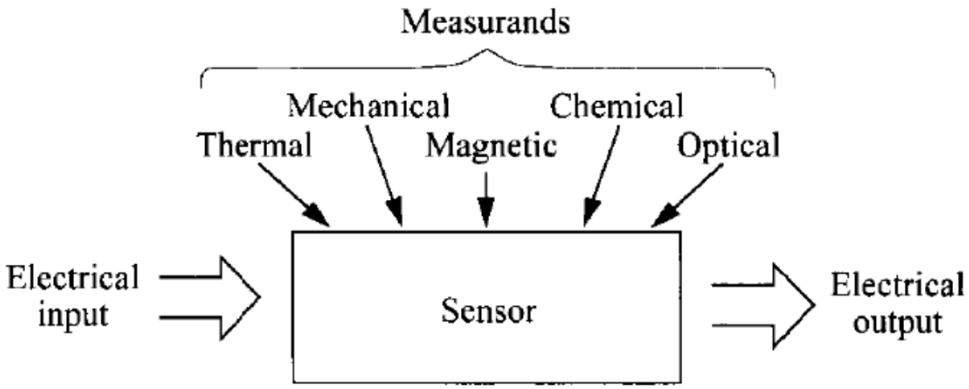
MEMS: ÉRZÉKELŐK

MEMS: érzékelők

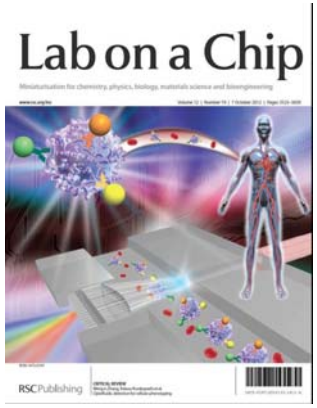
A legjobb minta: az emberi érzékelés (biomimetika)

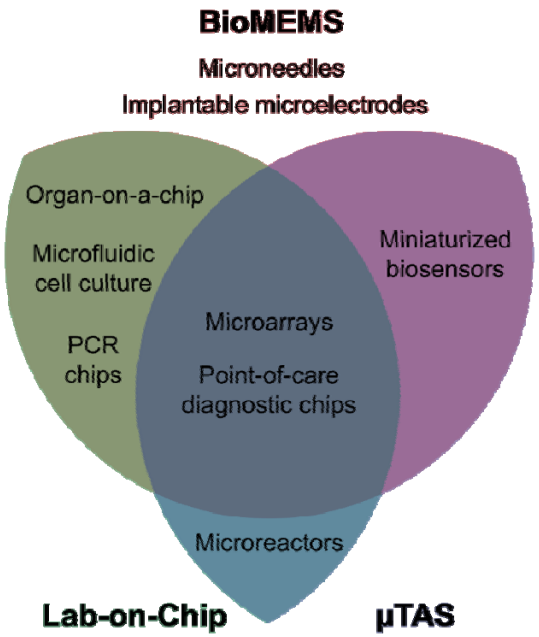


MEMS: érzékelők



- Termikus érzékelők
- Mechanikai érzékelők
- Mágneses érzékelők
- Kémiai érzékelők (bioszenzorok)
- Optikai érzékelők





BioMEMS (mikrorendszerek)

- Mikrofluidika →
- Bioérzékelők →

Lab-on-a-Chip

- Micro-Total-Analysis-Systems - microTAS

MEMS: termikus érzékelők

- **Termisztor** (thermally sensitive resistor) – fém-oxid vagy kristályos félvetők
  - Fém-oxidok: Mn_2O_3, NiO, Co_2O_3, Cu_2O, Fe_2O_3, TiO_2, U_2O_2 porból szinterezve – 200-700°C
  - Kristályos félvezetők: Ge, Si (10^{16} - 10^{17} 1/cm^3) – 1-100K és 250K alatt
  - Al_2O_3, BeO, MgO, ZrO_2, Y_2O_3, Dy_2O_3 – magasabb hőmérsékletekre

Negatív hőmérsékleti koefficiens: vezetőképesség: $\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p)$

aktív töltéshordozó koncentráció: $\propto \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$

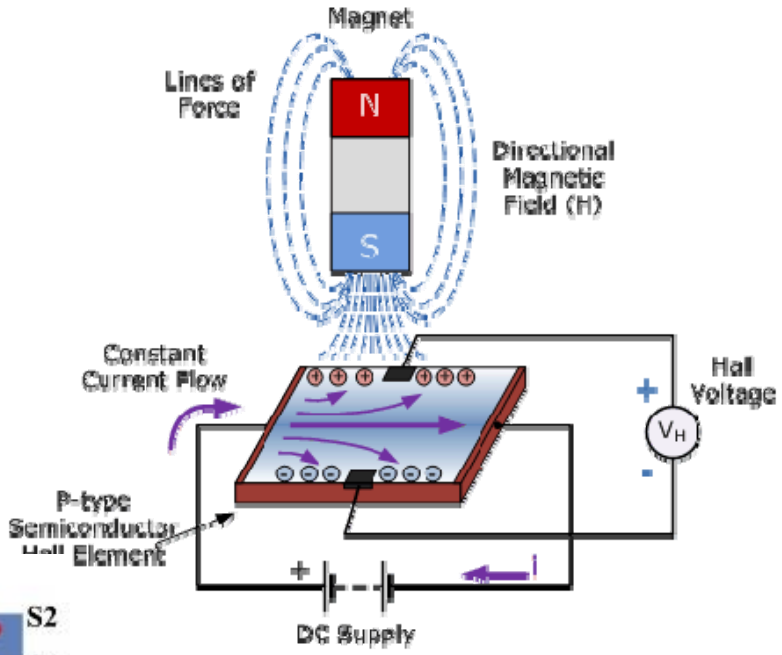
$\Delta R = R\alpha\Delta T$ α tipikusan -5 %/K

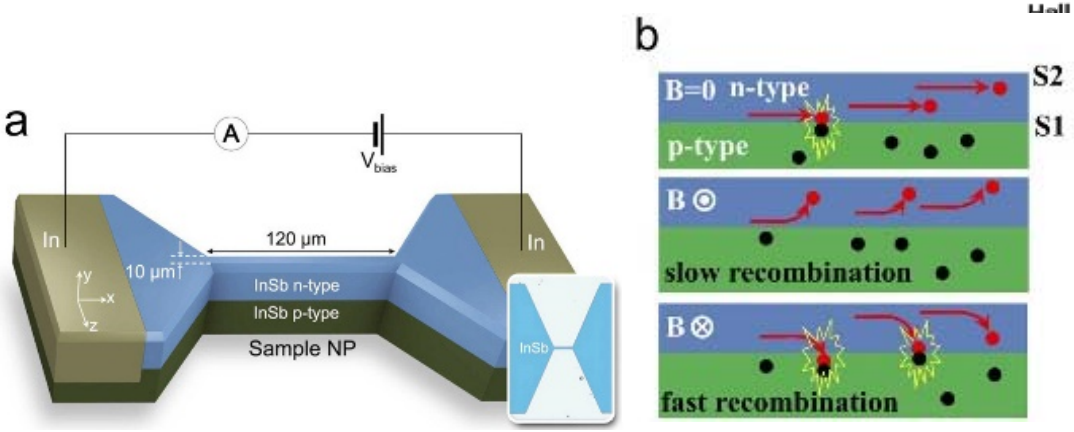
- **Félvezető eszköz (dióda, tranzisztor)** szenzorok (hőmérsékletfüggő karakterisztika)
- **Ellenállás alapú hőmérséklet érzékelők: Pt100** (hőmérsékleti koefficiens: 3.96×10^{-3} 1/K)
- **Termopár** (Seebeck, Peltier, Thomson effektus)

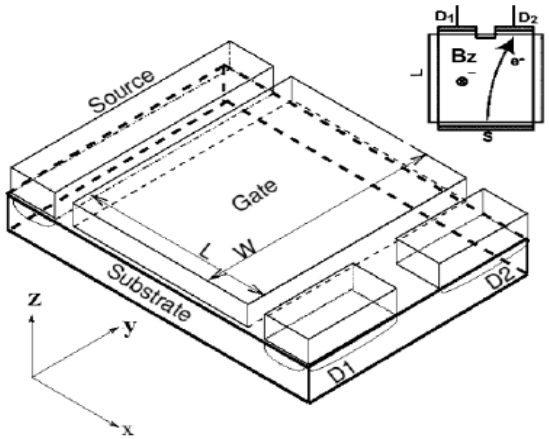
MEMS: mágneses érzékelők

Direkt márneses tér mérés, pozíció és mozgás érzékelés

- **Hall szenzor** (InSb, InAs, GaAs, Si, Ge)
- **Magnetorezisztor:** fizikai effektus a töltéshordozók módosult útja miatt
- **Magnetodióda, magnetotranzisztor** (mágneses térben megnövekszik a rekombinációs áram)



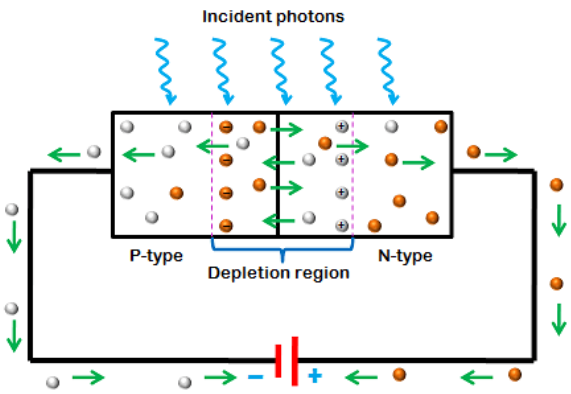




- **Mágneses térre érzékeny térvezérelt tranzisztor** (MAGFET)

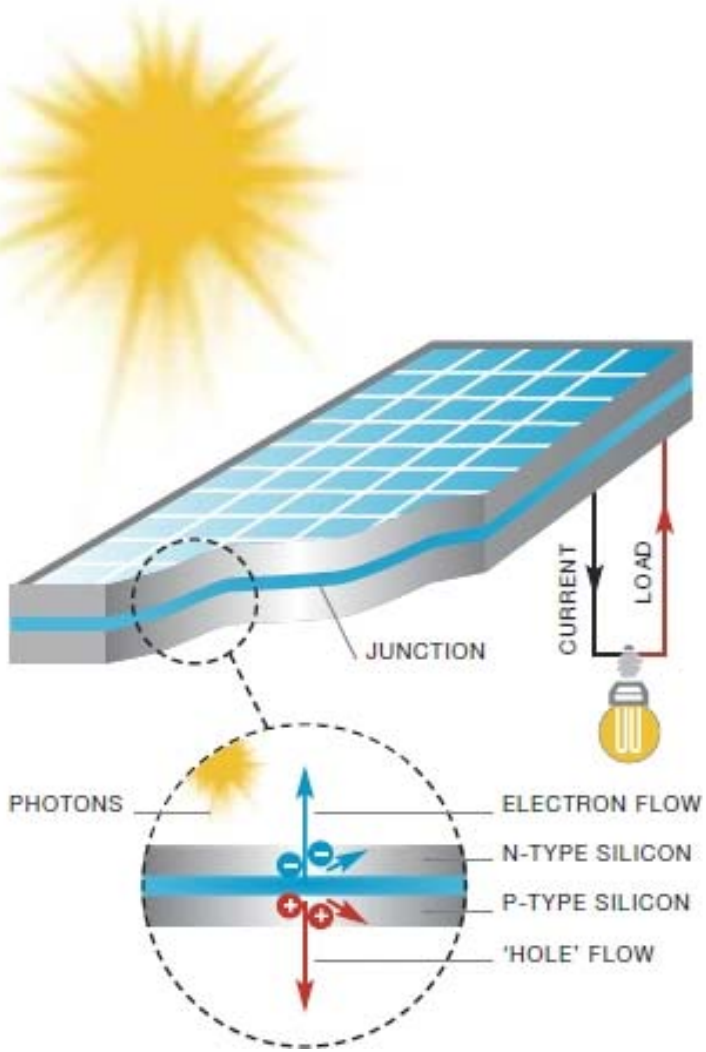
MEMS: optikai érzékelők

- **Fényérzékeny ellenállások:** tipikusan passzív félvezető eszközök (CdS, CdSe, PbS, InSb, Ge:Cu)
- **Fotovoltaikus eszközök:** napelemek
- **Fotodiódák, fototranzisztorok:** vezetési karakterisztika változás



PN Junction photodiode

www.physics-and-radio-electronics.com



MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK

MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK

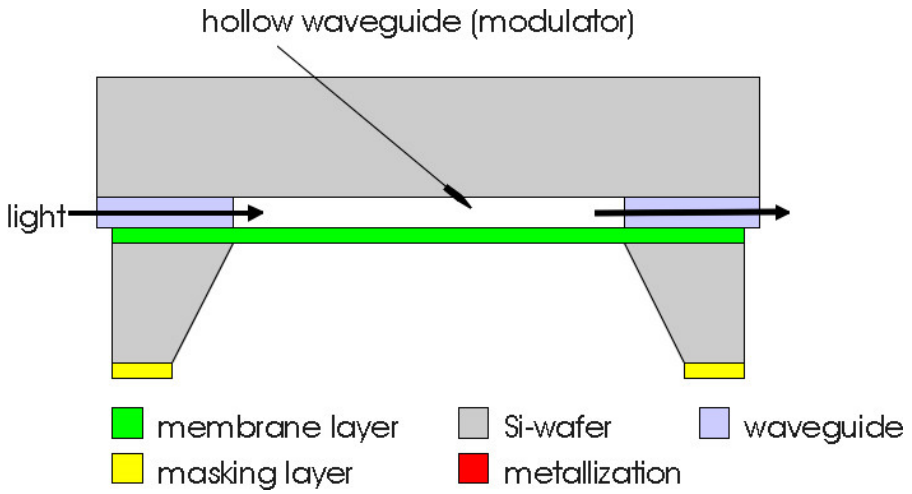
Mechanikai mennyiségeket (erő, súly, tömeg, elmozdulás, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, folyadék szint, sűrűség…) mérnek.
A mérés közvetlenül a szenzor paramétereire gyakorolt hatáson keresztül történik, ez többnyire szintén mechanikai természetű.

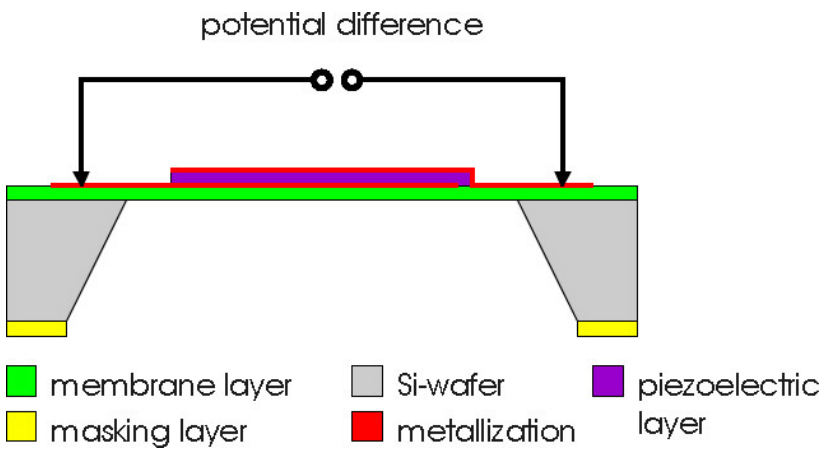
Membrán → deformáció → jelátalakítás

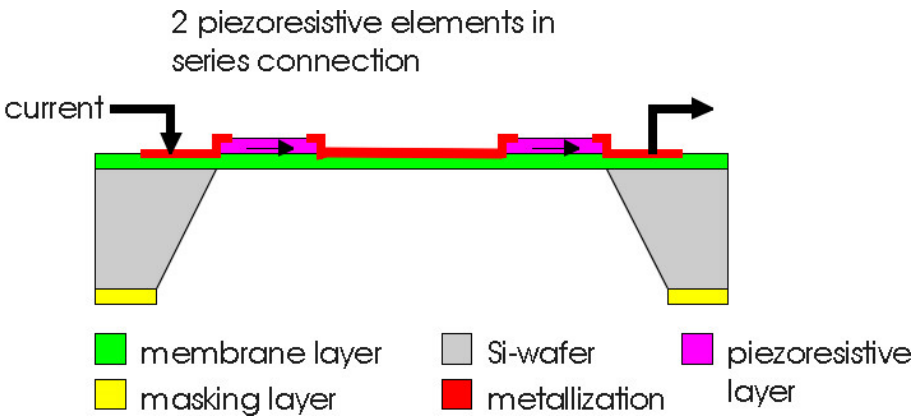
A mérendő mennyiség szerint (pl. nyomásmérő, gyorsulásmérő, stb…)

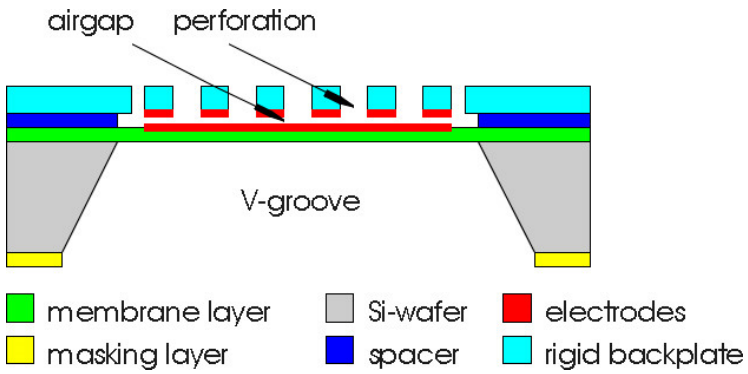
A jelátalakítás módszere szerint:
- optikai
- piezoelektromos
- ellenállás (strain gauge): pl. piezorezisztív
- kapacitív

Péda: HP mikrofon szerkezetek

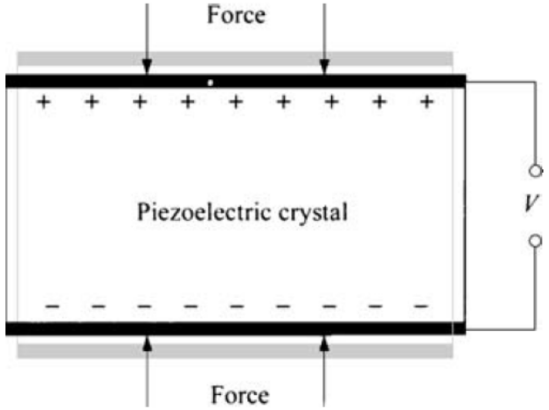


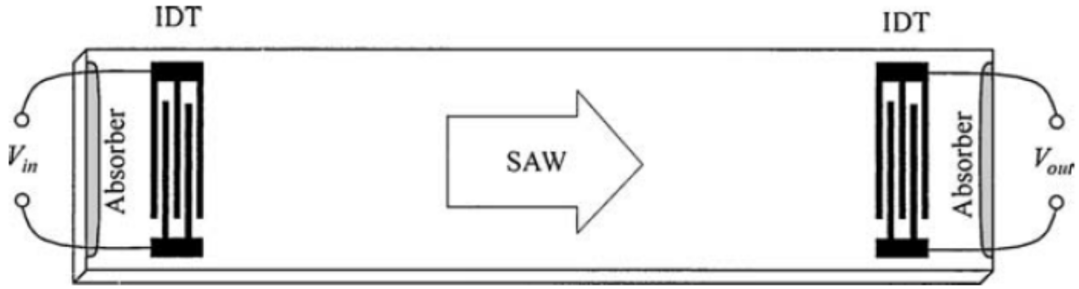


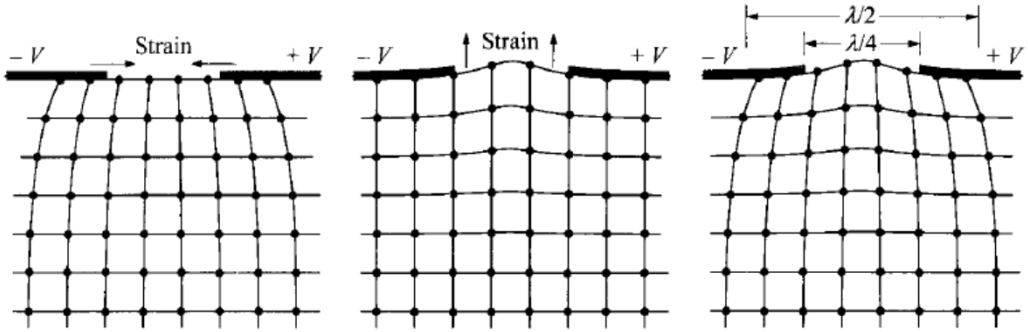




A piezelektromos érzékelés elve



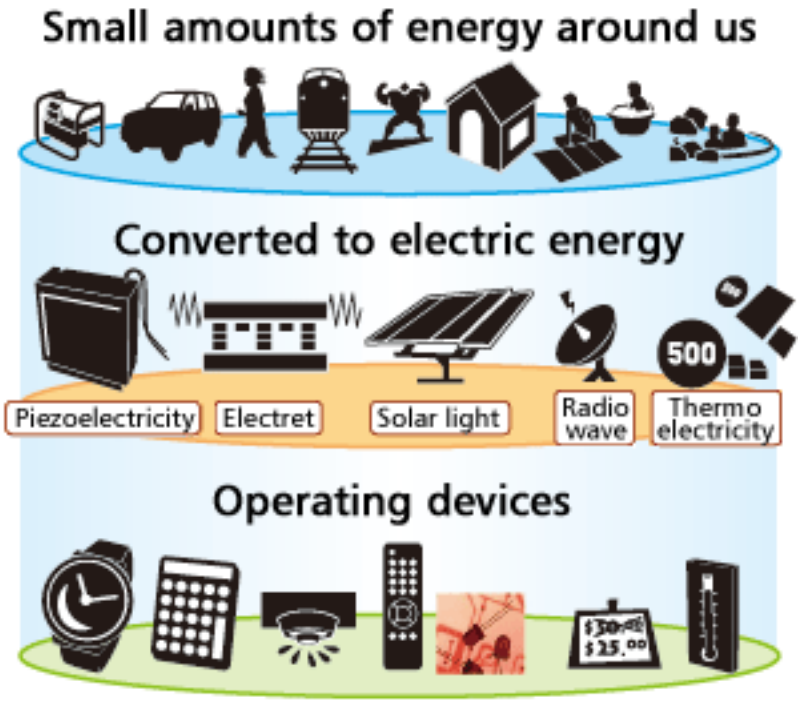




Alkalmazott anyagok:
kvarc, ZnO, turmalin (boroszilikát), kerámiák: PZT vagy $BaTiO_3$

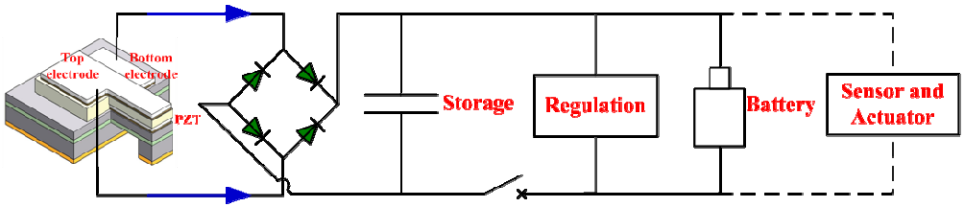
SAW (felületi akusztikus hullám): elasztikus hullám az adó és a vevő között, aminek terjedési sebessége a közeg tulajdonságaitól függ (elasztikus merevség és sűrűség).
Alkalmazott anyagok: kvarc, $LiNbO_3$, ZnO, $BaTiO_3$, $LiTaO_3$, PZT / CdS, CdSe, CdTe, GaAs
Alkalmazás: hőmérséklet, páratartalom, gáz és bioérzékelés vagy sávszűrő

Energy harvesting

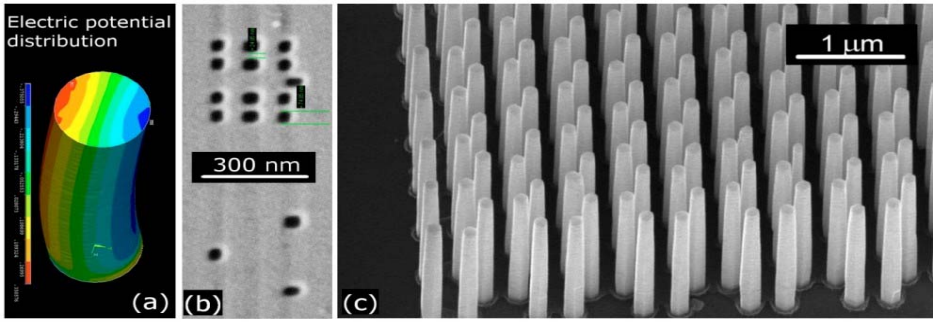


Alapvető források:

Konverzió, tárolás, táplálás:

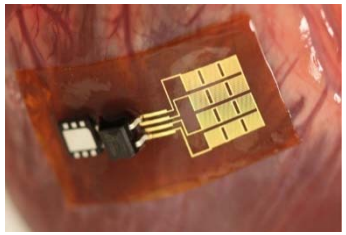


ZnO nanooszlopok (piezoelektromos)



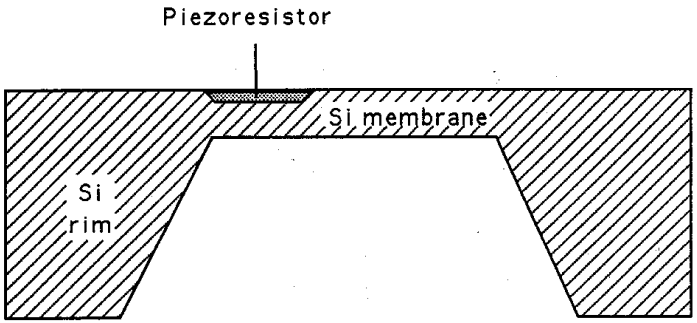
Alkalmazási példák:

imec

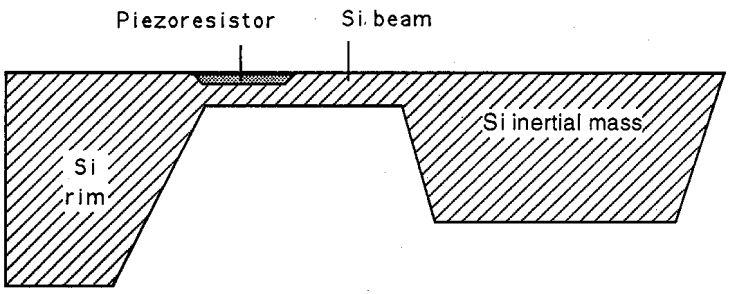


Piezorezisztív érzékelők

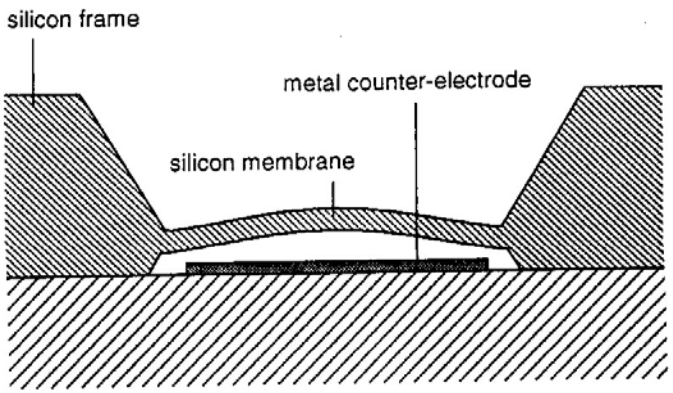
Membrán típusú szenzor:

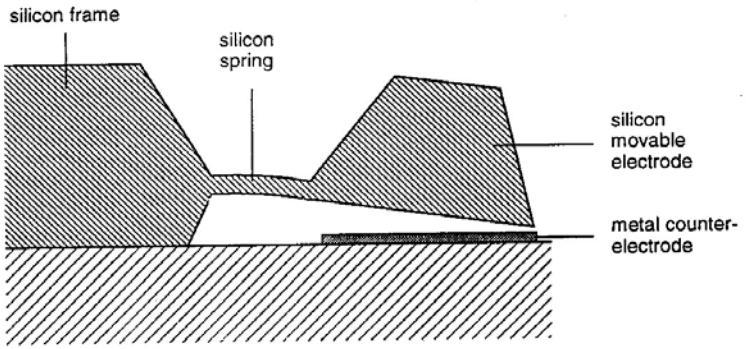


Befogott tartó típusú szenzor:



Kapacitív érzékelők



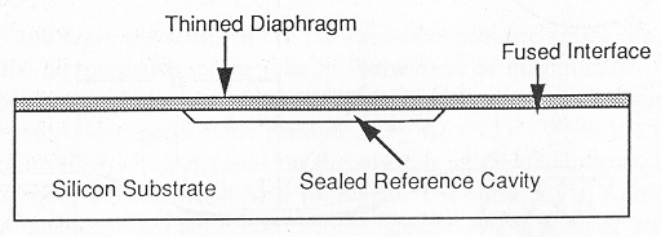


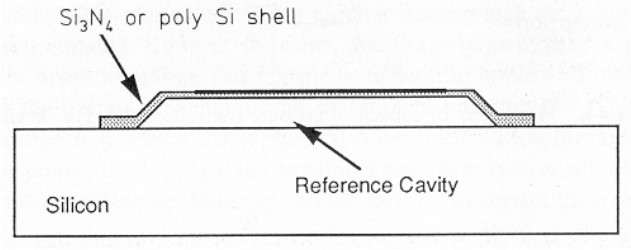
A kapacitív érzékelés elve

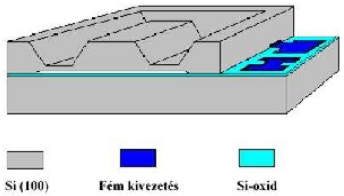
Párhuzamos elektródájú elrendezésben a kapacitás: $C_o = \varepsilon \frac{A}{d}$ $\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon \frac{A}{d^2}$

kis elmozdulásokra, ha a kondenzátor síkkondenzátor marad a Δd-vel való elmozdulásra:

Kapacitív érzékelők tömbi és felületi mikromechanikai megmunkálással:

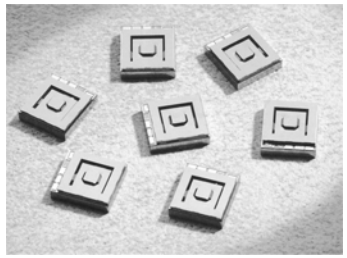






Előnyök:

- nagy érzékenység
- a konverzió csak a mechanikai méretektől és a rugalmassági állandótól függ
  $\rightarrow$ a hőmérséklet függés csak a Si hőtágulásából adódik

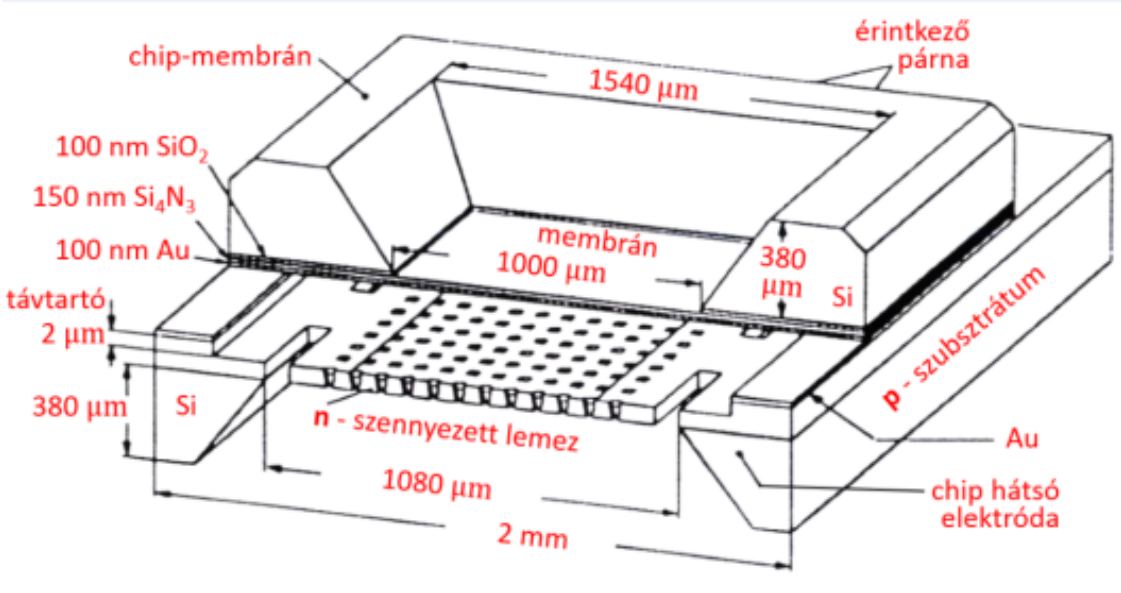


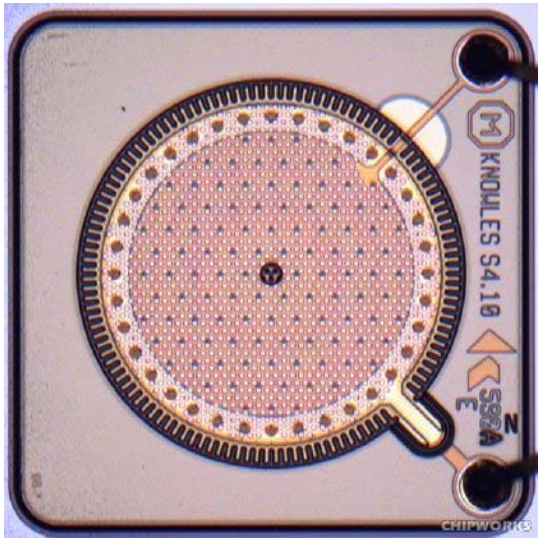
Hátrányai:

- nemlineáris karakterisztika, ez különösen nagy lehajlásoknál
- a közel lineáris szakaszban nem elhanyagolhatóak a szórt kapacitások

MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)

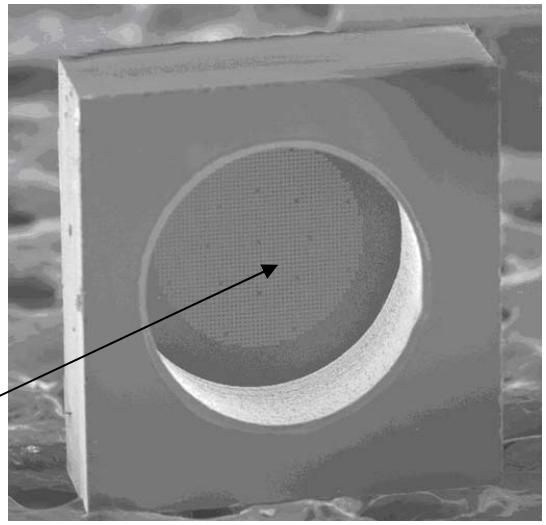




Felső elektróda: Au SiO_2 / SiN_x membránon
Alsó elektróda: nSi

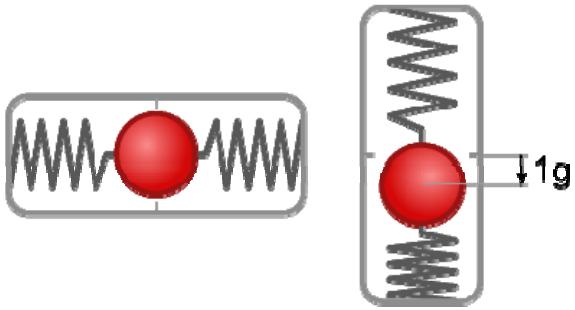
$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon \frac{A}{d^2}$$

DRIE (mély reaktív ionmarással) mart membrán

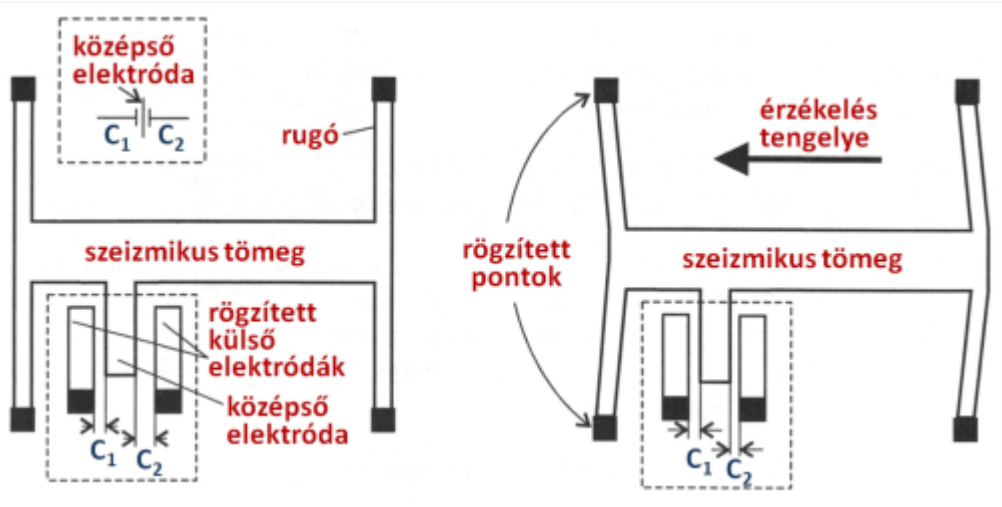


GYORSULÁS - GRAVITÁCIÓ

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése

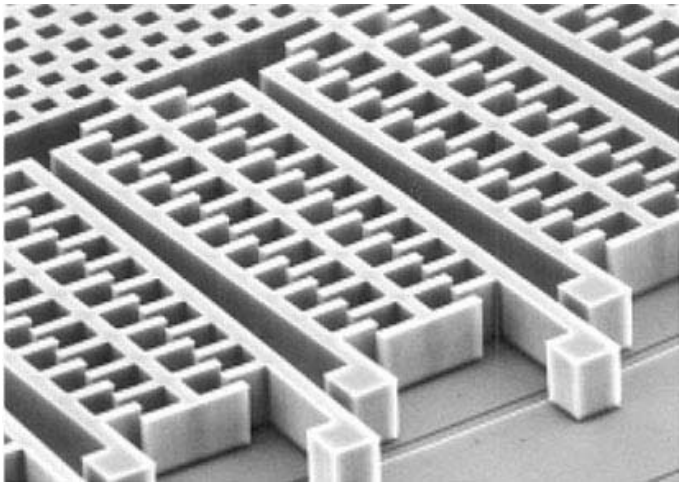


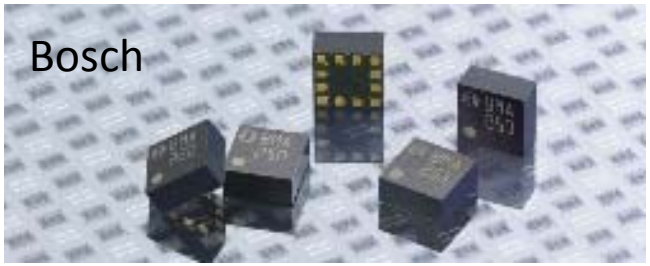
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



Párhuzamos elektródájú (síkkondenzátor) elrendezésben az érzékenység kis elmozdulások esetén:

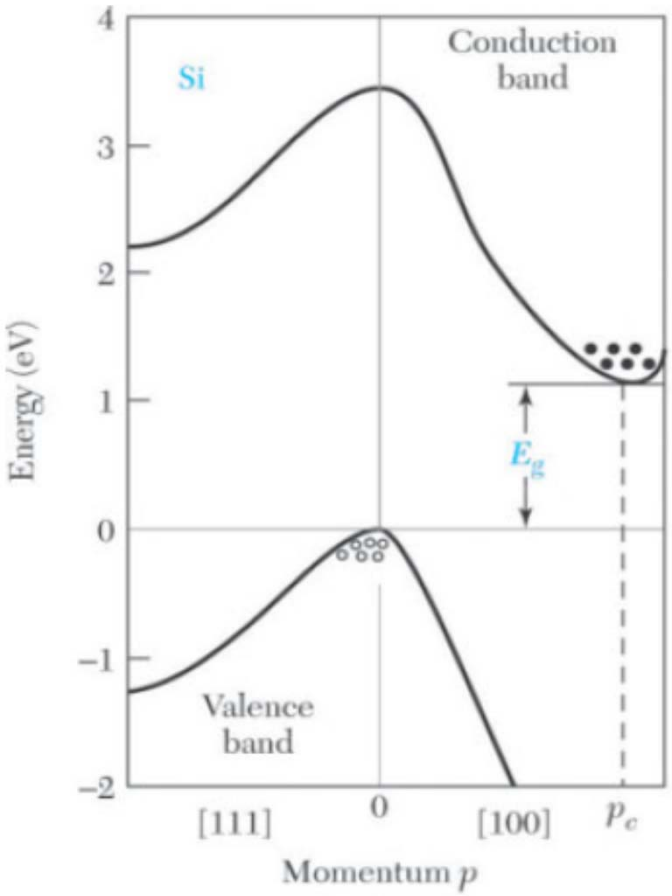
$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon \frac{A}{d^2}$$





A piezorezisztív érzékelés elve

Mullaney (1944)



Gauge factor: $GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$ $\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho}.$

Geometriai effektus esetén: GF ~ 1.4 – 2

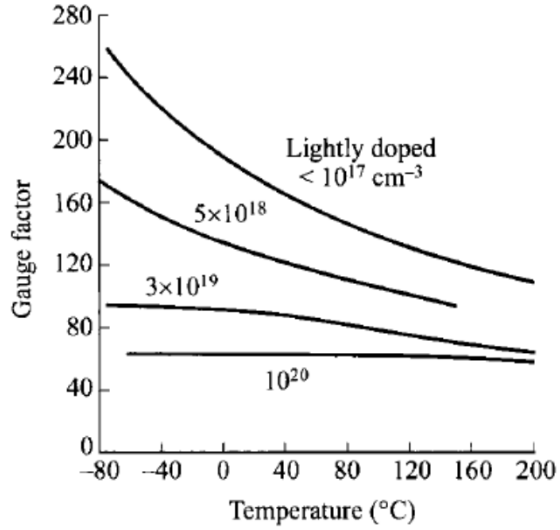
Félvezetőkben (Bardeen, Shockley majd Herring):
Sok-völgyes modell

$$m^* = \frac{h^2}{d^2E/dk^2}$$

$$\sigma = \frac{q\bar{t}}{m^*}$$

Függ:

- hőmérséklet,
- kristálytani orientác
- adalékolás,
- előfeszítés…



MESTERSÉGES TAPINTÁS

Humán tapintó receptorok

BIOMIMETIKUS ERŐÉRZÉKELÉS

A tapintás analógiája

- statikus nyomás, alacsony és magas frekvenciás vibráció, NYÍRÓERŐ!!!,
- csúszás, érdesség, mintázat, alak…

Sensors and Actuators A 179 (2012) 17–31

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Sensors and Actuators A: Physical

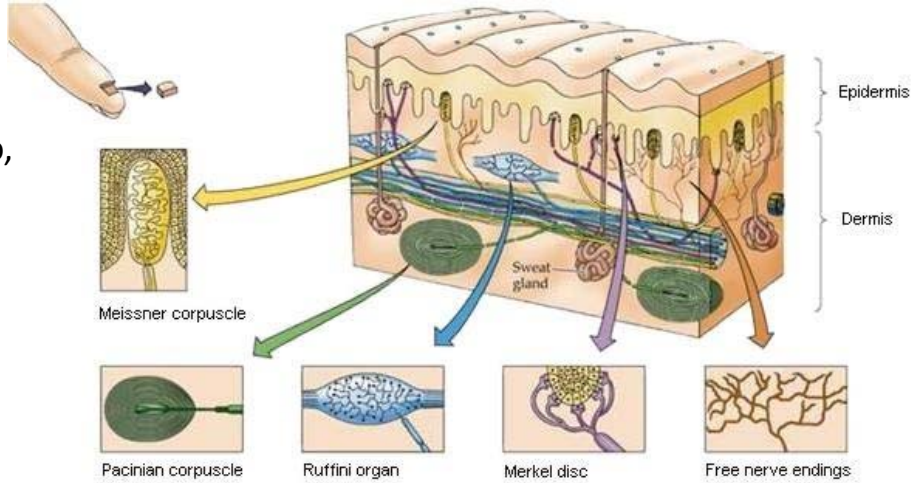
journal homepage: www.elsevier.com/locate/sna

Review

A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering

Mohsin I. Tiwana, Stephen J. Redmond, Nigel H. Lovell *

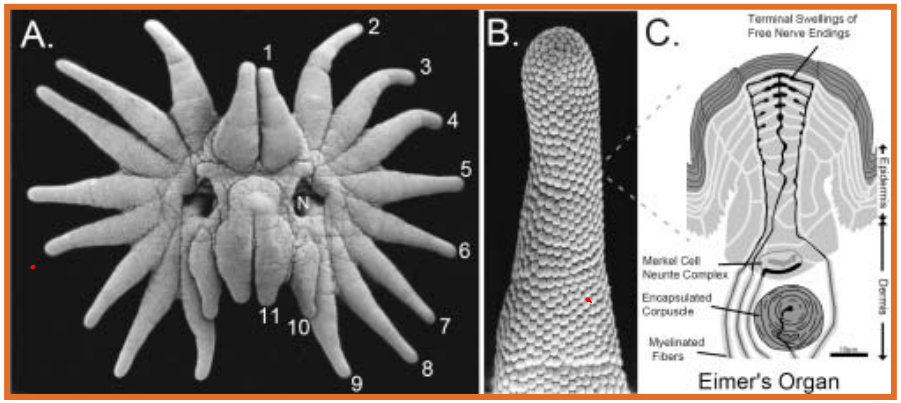
Graduate School of Biomedical Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia



Type	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacini
Number	25%	19%	43%	13%
Adaptivity	Slow	Slow	Fast	Fast
Receptor type	SAI	SAII	FAI	FAII
Field diameter	3–4 mm	>10 mm	3–4 mm	>20 mm
Frequency range	0–30 Hz	0–15 Hz	10–60 Hz	50–1000 Hz
Response to indentation $S(t)$	S, $\frac{ds}{dt}$	S	$\frac{ds}{dt}$	$\frac{d^2s}{dt^2}$
Response to constant indentation	Yes	Yes	No	No
Location	Superficial	Deep	Superficial	Deep
Receptive field	Small	Large	Small	Large
Innervation density	High, variable	Low, constant	High, variable	Low constant
Sensed parameter	Local skin curvature	Directional skin stretch	Skin stretch	Non localized vibration

MESTERSÉGES TAPINTÁS

and the WORLD CHAMPION is …



Csillagorrú vakond:
tapintó szem – Eimer szerv

MESTERSÉGES TAPINTÁS

Application industry	Key utility and application areas	Design challenges
Robotics	Dexterous manipulation Tele-robotics Service robots Exploration robots Rescue robots	Arrayed sensors Discrimination and classification algorithms Repeatability, wear resistance and wide dynamic range Customization Characterized response over wide temperature range High frequency response
Biomedical	MIS tools Tele-robotic operations Diagnostics tools Rehabilitation medicine Dentistry Patient care Gait analysis systems	Biocompatibility Rugged to withstand sterilization process Cost due to their disposable nature Characterization and classification algorithms Wireless interfaces Power consumption High frequency response Electrocutaneous feedback mechanisms Safety and reliability Ergonomics
Sports	Posture analysis Sports training	Conformable and customizable sensors Durability Wiring and power constraints Wireless interfaces
Agriculture and food processing	Service robots, such as for fruit picking	Adaptability to unstructured environments Toxin and allergin free construction Hygiene and cleanliness Safe for food handling Dexterous movement Soft grippers Unexplored application area
Aerospace and automobiles industry	Safety studies Safety devices Diagnostic tools Acceleration optimization systems Navigation interfaces for mobile devices	Device centered sensor design Safety and reliability Rugged to withstand high shear, tensile and normal forces Unexplored application area
Consumers products	Healthcare products such as intelligent toothbrushes Service Robots for elderly Textile and clothing	User acceptance Wear resistance and reliability Cost, so that it can target wider application market Rugged to bear abuse

3D KONTAKT-ERŐ MÉRÉS

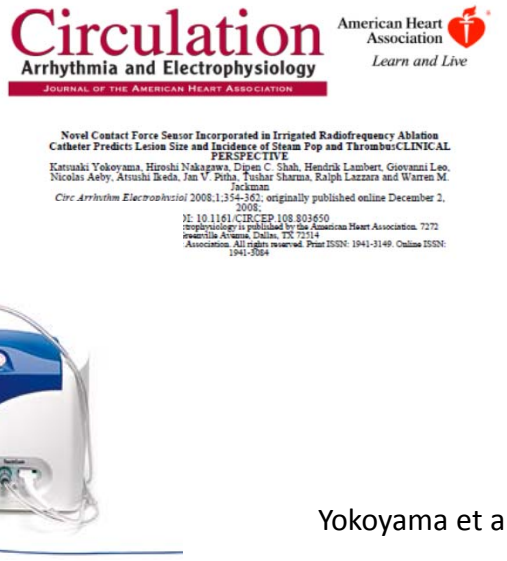
Elektro-anatomiai térképezés és katéterablláció

KATÉTERABLÁCIÓ

- ventrikuláris tachycardia kezelése
- ingerületvezetési rendellenesség felderítése impedancia térképezéssel
- nehézség: jó kontaktus a szívfal és a katéter-elektróda között

IN VIVO KONTAKT-ERŐ MÉRÉS

a katéter-fej és a szívfal közötti kontakterő vizualizációja



Circulation
Arrhythmia and Electrophysiology
Journal of the American Heart Association

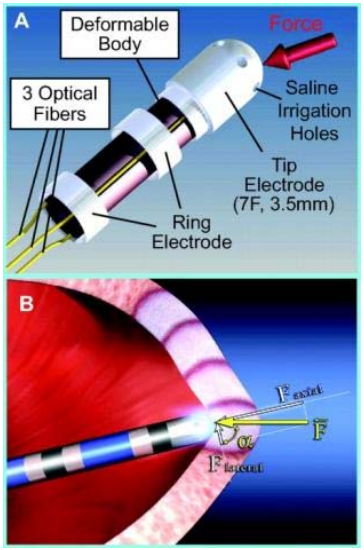
American Heart Association
Learn and Live

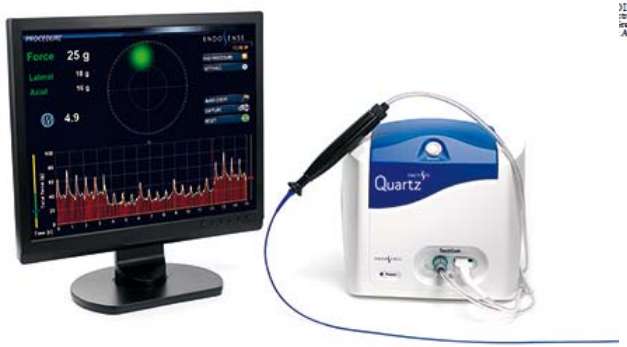
Novel Contact Force Sensor Incorporated in Irrigated Radiofrequency Ablation Catheter Predicts Lesion Size and Incidence of Steam Pop and Thrombus:CLINICAL PERSPECTIVE

Katsuaki Yokoyama, Hiroshi Nakagawa, Dipen C. Shah, Hendrik Lambert, Giovanni Leo, Nicolas Aeby, Atsushi Ikeda, Jan V. Pitha, Tushar Sharma, Ralph Lazzara and Warren M. Jackman

Circ Arrhythm Electrophysiol 2008;1:354-362; originally published online December 2, 2008;

DOI: 10.1161/CIRCEP.108.803650
Electrophysiology is published by the American Heart Association. 7272 Greenville Avenue, Dallas, TX 75214
Association. All rights reserved. Print ISSN: 1941-3149. Online ISSN: 1941-3084





TACTICATH QUARTZ

Yokoyama et al.

3D KONTAKT-ERŐ MÉRÉS

Minimálisan Invazív Műtéti (MIS) beavatkozások esetén

LAPAROSZKÓPIÁS beavatkozás

Előny a páciensek számára:

- kisebb fájdalom,
- gyorsabb felépülés,
- kisebb vágás.

Hátrány a sebész számára:

- 2D kép / endoszkópkamera
- tükrözött kép,
- **A TAPINTÁS HIÁNYA!!!**

Vizuális feedback:
Információ: szövet alakja, színe, objektumok helye, sebessége.

Kinaesthetikus feedback:
Információ az objektum helyéről, sebességéről, erőről.

Tapintásos feedback:
Információ: hőmérséklet, nyomáseloszlás, textúra, nyújthatóság, benyomhatóság, vibráció.

Medical Engineering & Physics 31 (2009) 887–898

Contents lists available at ScienceDirect

Medical Engineering & Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/medengphy

ELSEVIER

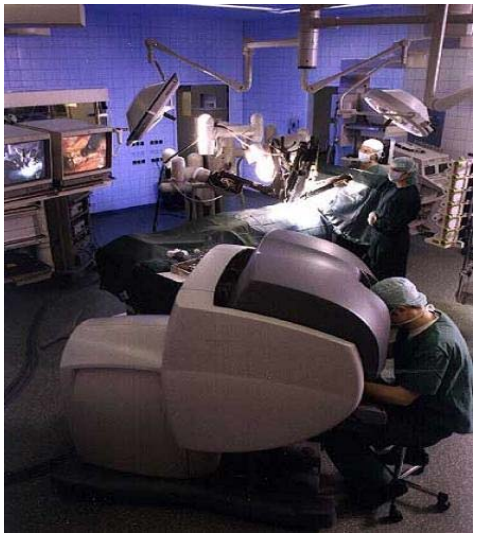
Review

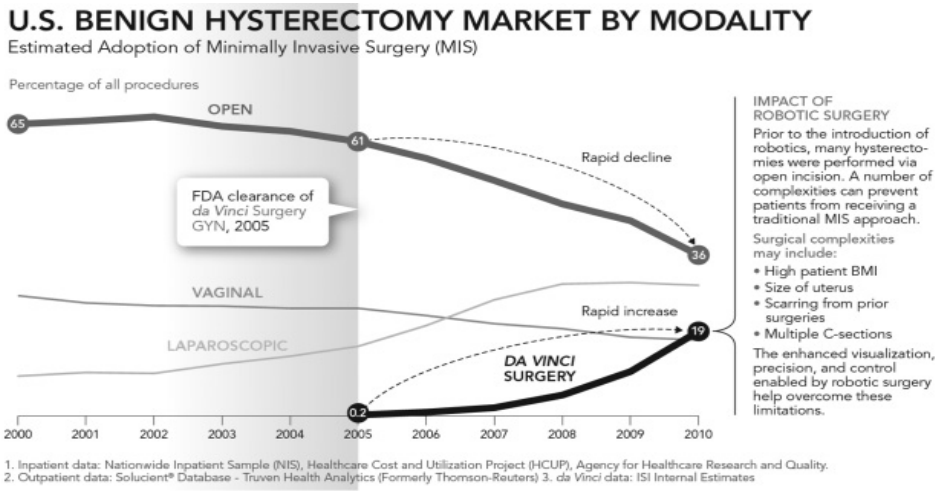
Review on aspects of artificial tactile feedback in laparoscopic surgery

Sebastian Schostek[a,b,*], Marc O. Schurr[a], Gerhard F. Buess[b]

[a] novineon Healthcare Technology Partners GmbH, Tübingen, Germany
[b] Section for Minimally Invasive Surgery, Eberhard-Karls University Tuebingen, Tuebingen, Germany

Da Vinci (MIS) Sebészeti Robot





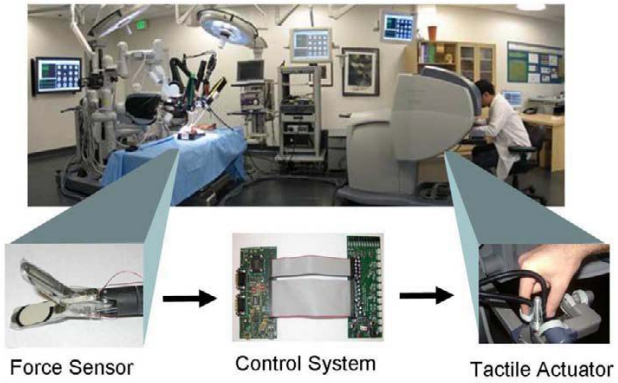
3D KONTAKT-ERŐ MÉRÉS

Minimálisan Invazív Műtéti (MIS) beavatkozások esetén

ROBOTIC SURGERY – STATE OF THE ART

DaVinci és Zeus rendszerek (Remote Surgery - Távoperáció)

- a pontos erővisszajelzés hiánya



Medical Engineering & Physics 31 (2009) 897–898

Contents lists available at ScienceDirect

Medical Engineering & Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/medengphy

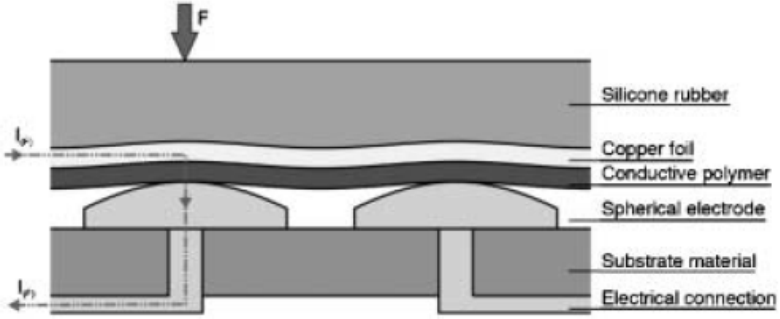
Review

Review on aspects of artificial tactile feedback in laparoscopic surgery

Sebastian Schostek[a,b,*], Marc O. Schurr[a], Gerhard F. Buess[b]

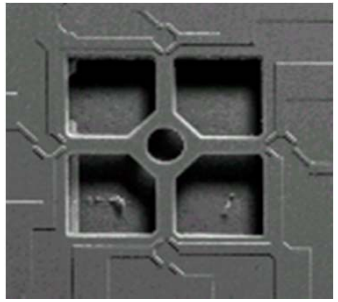
Tapintás érzékelő mátrix a laparoszkóp-csipeszek között: nyomáseloszlás

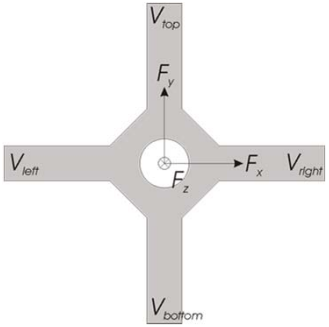
[Grundfest 2009]



3D PIEZOREZISZTÍV ERŐDETEKTOR

- Egyoldalas Si mikromechanikai megmunkálás
- Piezorezisztív érzékelés
- Lineáris elmélet: a felületi erők és a mért feszültségek között egyszerű összefüggés
- A három erőkomponens egymástól függetlenül mérhető
- Minden érzékelő erő*vektor*t (nagyság + irány) mér!
- Érzékenység: 20-30 mV/mN (5V)

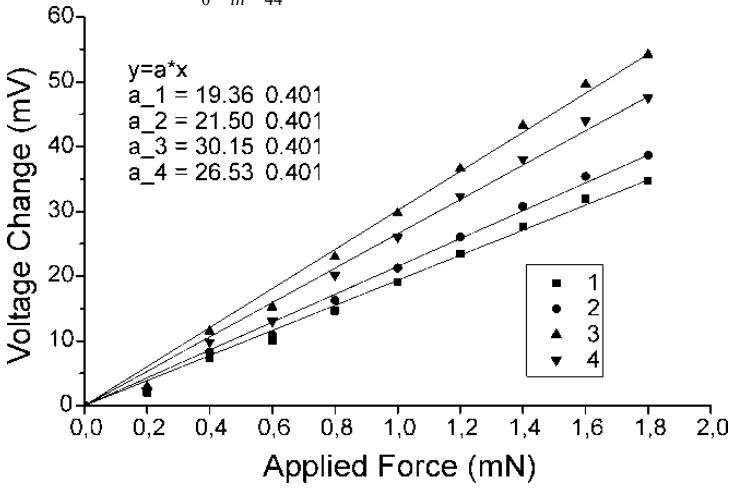




$$F_x = \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} \left(\Delta V_{right} - \Delta V_{left} \right),$$

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

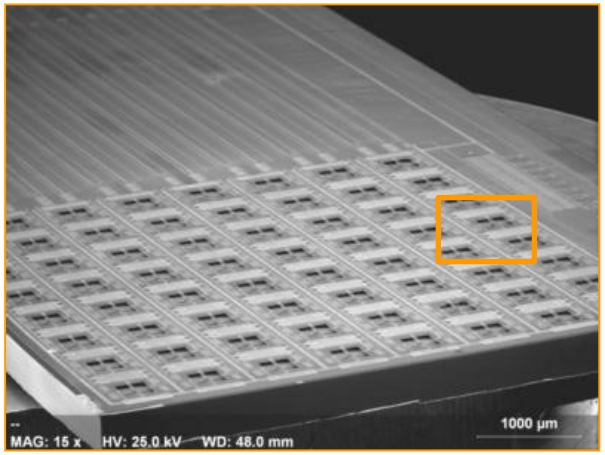
$$F_z = \frac{1}{V_0 \alpha_{ln} \pi_{44}} \frac{\left(\Delta V_{left} + \Delta V_{right} + \Delta V_{top} + \Delta V_{bottom} \right)}{2}.$$



3D PIEZOREZISZTÍV ERŐDETEKTOR

3D erőtérkép 2D felületen

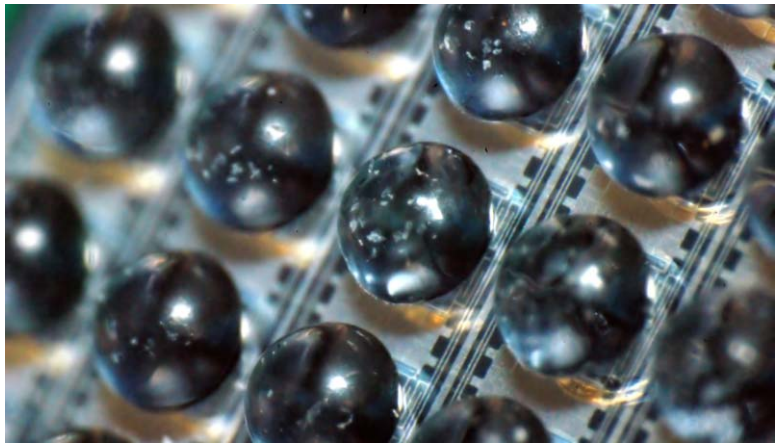
8x8 (7x7mm)
40 kontaktus,
MEMS + CMOS

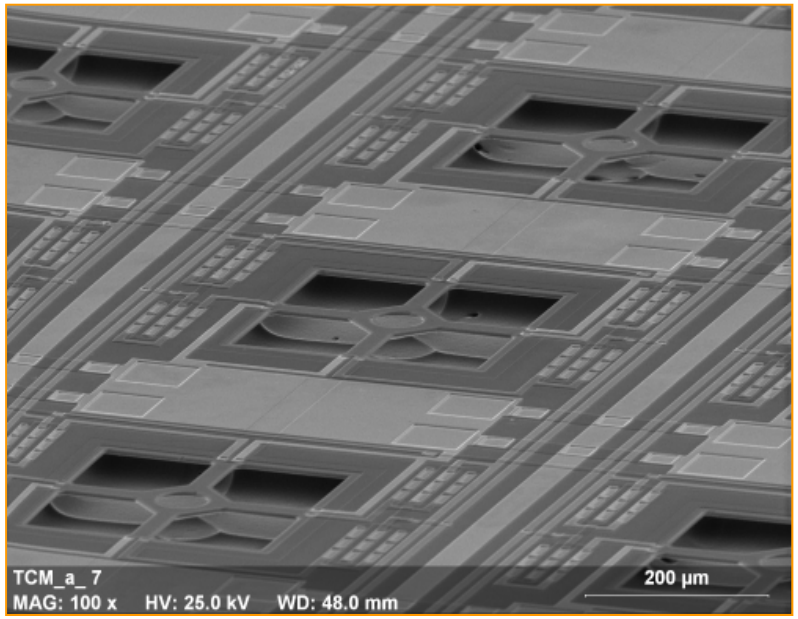


INTEGRÁLT KIOLVASÓ ELEKTRONIKA

Pórusos Si mikromechanika és CMOS technológia

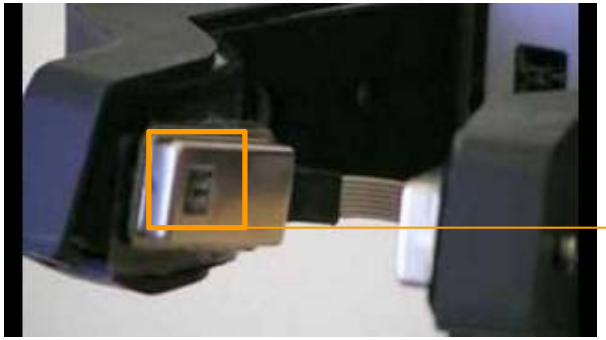
- érzékelő tömbök 64 (8x8) taxel méretig
- az ujjbegyhez hasonló felbontás és érzékenység
- neuromorf rugalmas borítás

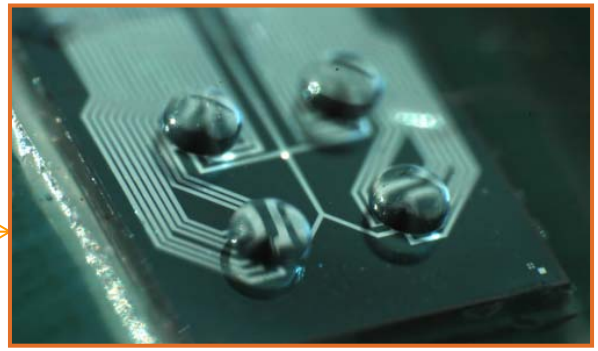




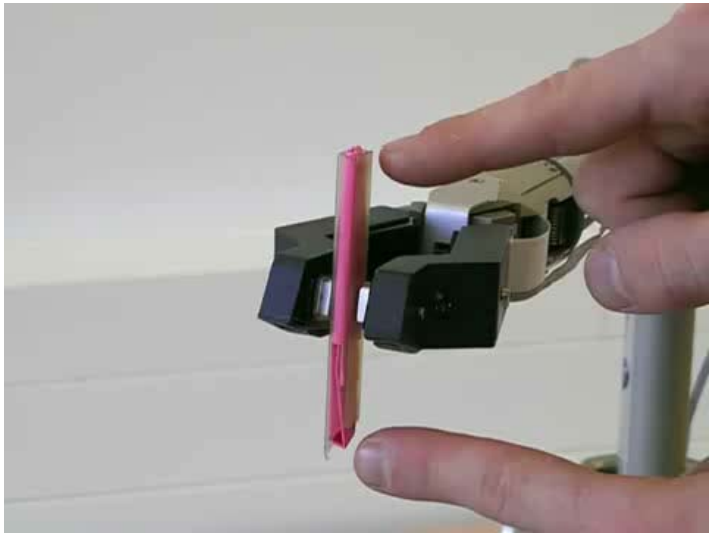
3D TAPINTÁSÉRZÉKELÉS ROBOTOKBAN

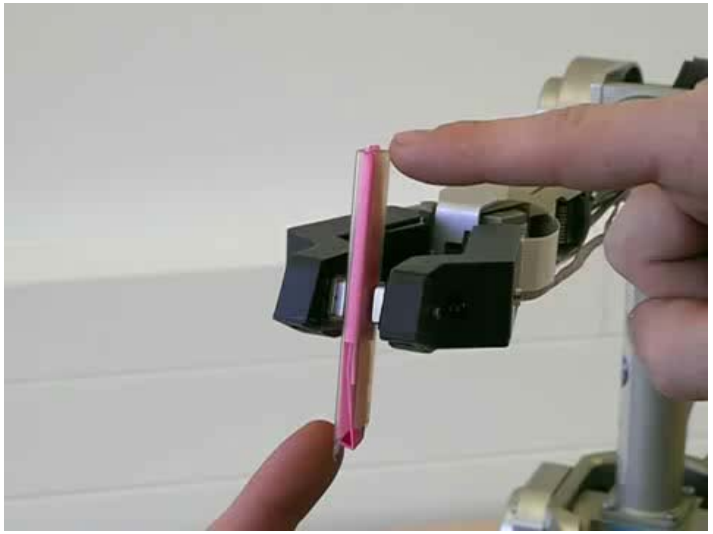
http://www.youtube.com/user/tactologic/videos





Erőmérő:
PDMS félgömbökkel



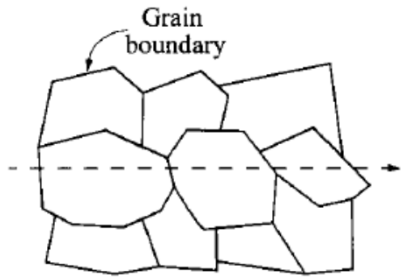


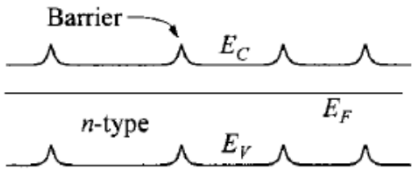
KÉMIAI SZENZOROK

Kémiai érzékelők

Molekula feismerése / koncentráció mérése

Félvezető-oxid / Taguchy típusú szenzorok
Polikristályos félvezető rétegek ellenállásváltozásán alapul



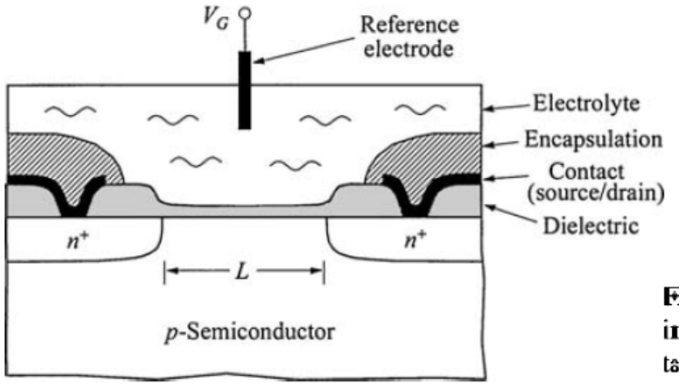


- SnO_2, Fe_20_3, TiO_2, ZnO, In_2O_3, WO_3, SnO_2
  (Pt, Pd nemesfém katalizátor)
- H_2, CH_4 (metán), O_2, 0_3 (ózon), CO, CO_2, NO, NO_2, SO_2, SO_3, HCl
- 200-300°C működési hőmérséklet (3-4eV csökkenthető)
- **Teória: a szemcsehatárokon kötött oxigént (ami a szemcsék közötti vezetést akadályozza) neutralizálja a gáz vagy reagál vele és elektront juttat a vezetési sávba**

ISFET – Ion szelektív térvezérelt trazisztor

- Si_3N_4, Al_20_3, TiO_2, Ta_2O_3

Katalitikus szenzorok
Katalitikus fém a gate elektródán,
ami az abszorbeált gáz hatására megváltoztatja
a kilépési munkát



Pellisztor típusú gázérzékelő éghető gázok mérésére

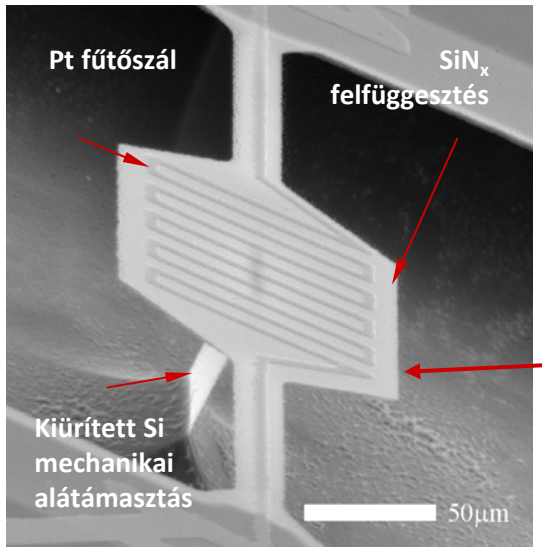
Heterogén katalízis során keletkező hő detektálása
(exoterm reakció emelt hőmérsékleten)

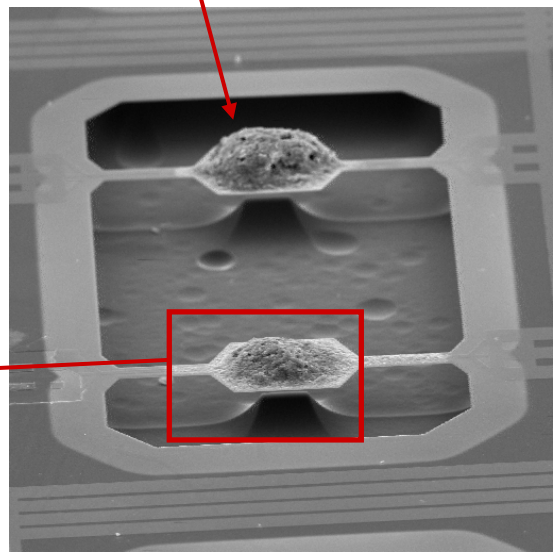
Alacsony teljesítményfelvétel

Éghető gázok robbanásbiztos detektálása

- robbanási határértékek (ARH-LEL, FRH-UEL)
  → koncentrációk
- gyulladási hőmérséklet: ahonnan az égés magától továbbterjed
  → megengedett felszíni hőmérséklet

Termikusan szigetelt platina mikro-fűtőtest

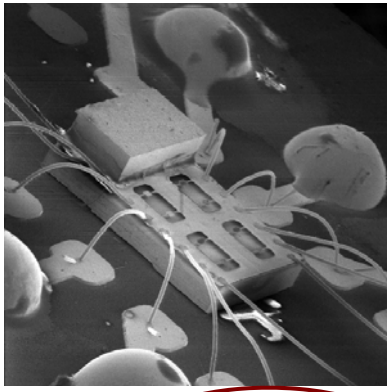


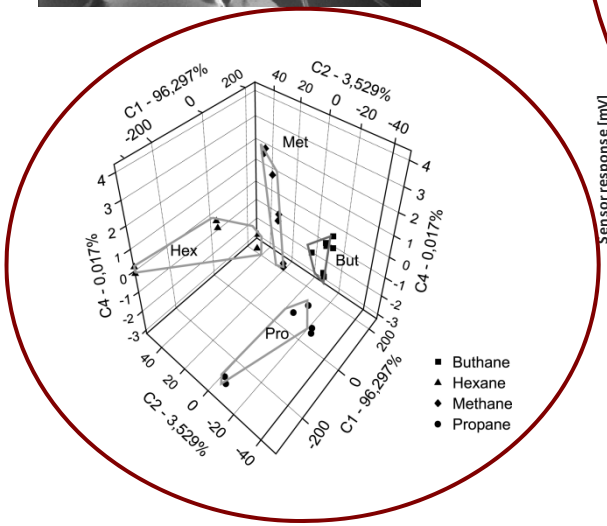


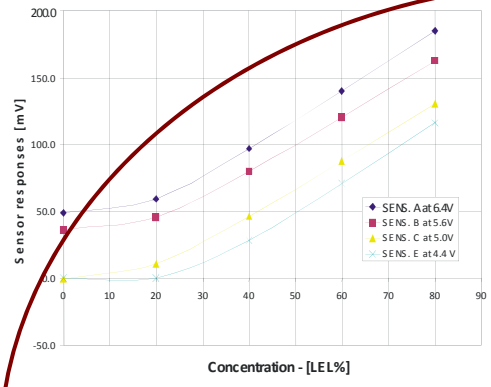
Strukturális anyagok:

- Si_3N_4
- SiN_x
- SiO_2
- SiO_xN_y
- rétegkombinációk

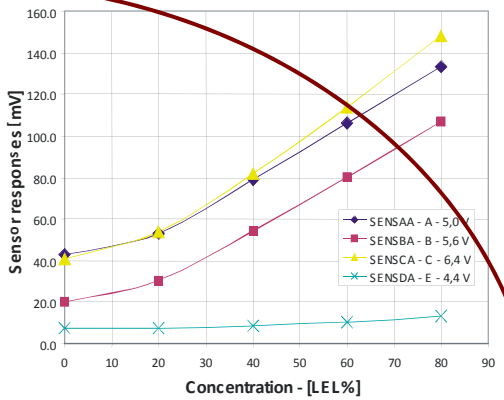
A szenzor alkalmazása



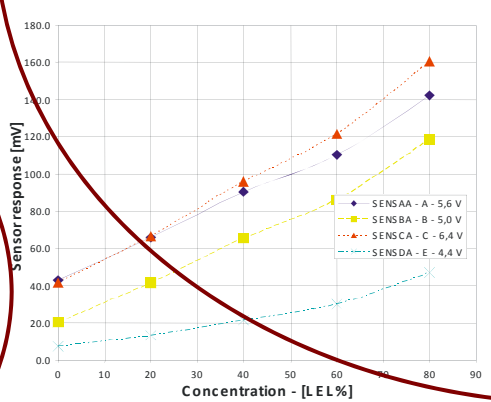




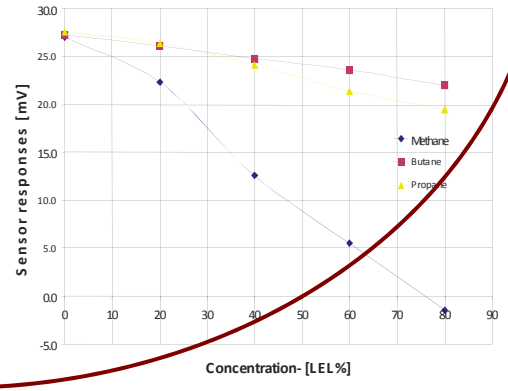
A szenzor válasza különböző bután koncentrációkra az ARH 80%-áig, különböző fűtőáramoknál



A szenzor válasza különböző propán koncentrációkra az ARH 80%-áig, különböző fűtőáramoknál



A szenzor válasza különböző hexán koncentrációkra az ARH 80%-áig, különböző fűtőáramoknál



A hővezetőképességi szenzor válasza különböző szénhidrogén koncentrációk esetén

BioMEMS

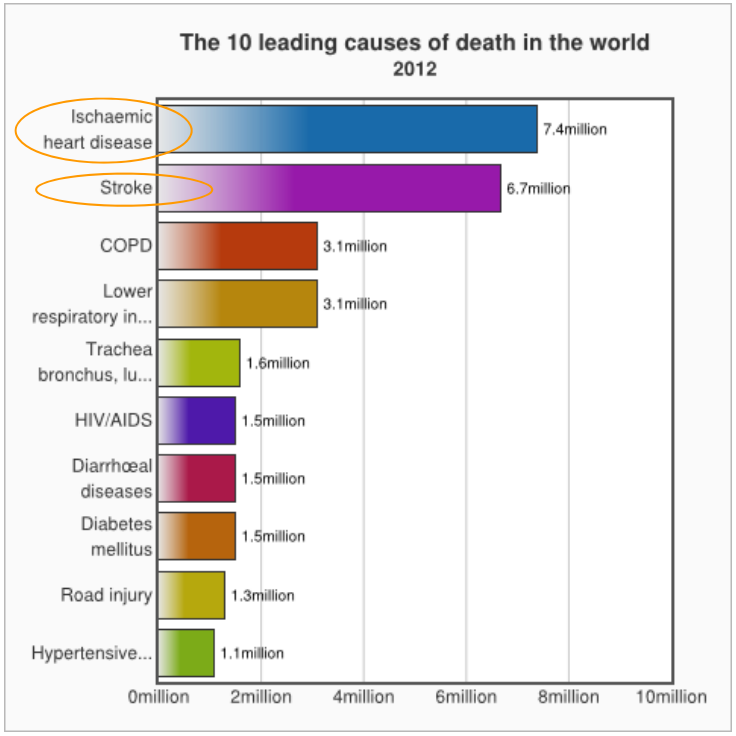
Bioanalitikai rendszerek

Motiváció: nagy áteresztőképességű, gyors és olcsó analitikai megoldások

1. - 2. KARDIOVASZKULÁRIS / CEREBROVASZKULÁRIS megbetegedések / katasztrófák
3. – 6. Fertőzéses megbetegedések (vírusos, bakteriális, parazitás)

Magyarország:
1. CVD, 2. Rák, 3. Stroke

- Multi-paraméteres tesztek antitest / DNS / marker-fehérjék detektálására
- Legyen: olcsó / gyors / eldobható kazetta
- Minta: teljes vér vagy vérplazma



http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/

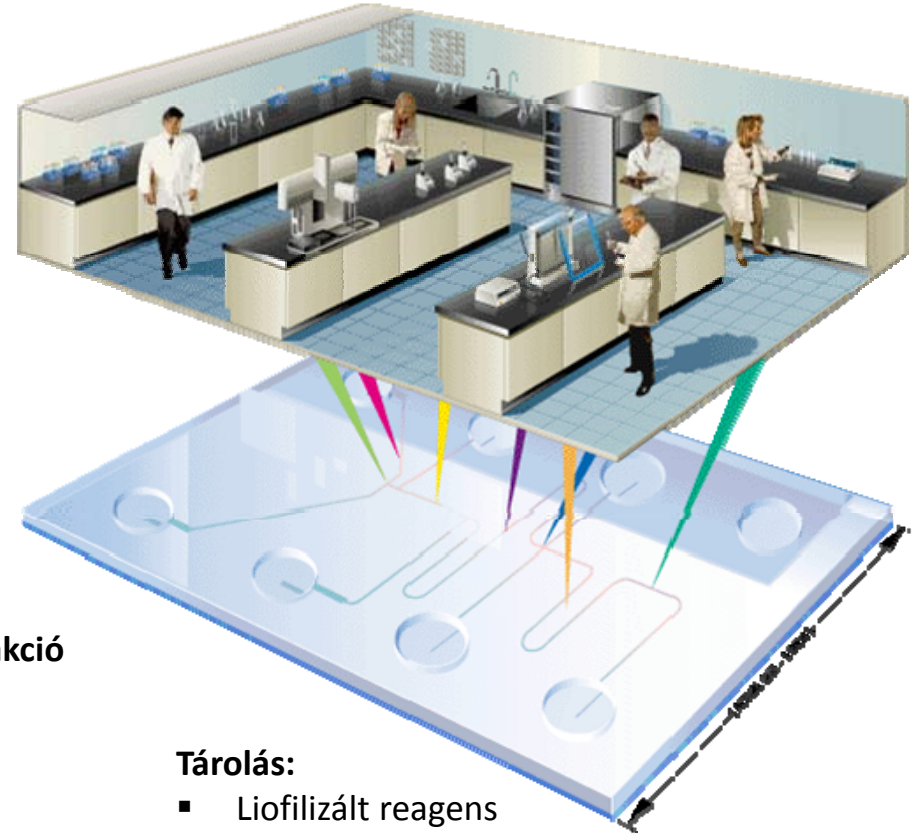
Projekt háttér:
Chip Architectures by Joint Associated Labs for EUropean diagnostics

LAB-ON-A-CHIP RENDSZER

Minta injektálás:
- Pipetta
- Luer csatlakozó
- Szeptum

Folyadékmozgatás:
- Perisztaltikus pumpa
- Fecskendőpumpa
- Integrált rendszer
- Mikropumpa
- Kapilláris erők

Keverés:
- Passzív kígyókeverő
- Kaotikus keverő (HB)
- Piezo technika
- Felületi / akusztikus hullámok



Reakció

Tárolás:
- Liofilizált reagens
- Folyadék tárolás
- Száraz tárolás

Kimenet

Technológia:
- Bondolás
- Felületmódosítás

Mérés / érzékelés
- Optikai
- Elektromos
- Elektrokémiai
- Integrált szenzor

Aktív / passzív szelepek

Szűrés, szeparáció:
- Inerciális (Dean…)
- Akusztikus
- Magnetoforetikus
- Elektroforetikus
- Dead-end / Cross-flow

Előnyei: nl-es mintatérfogat / reakcióidő csökkenése / eldobható / olcsó

MIKROFLUIDIKAI ESZKÖZÖK

folyadékok (gázok) manipulációja mikrométeres skálán

Mikro-

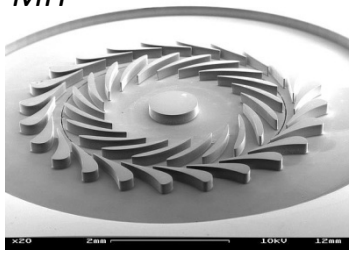
- fúvóka
- diszpenzer / adagoló
- tű
- turbina

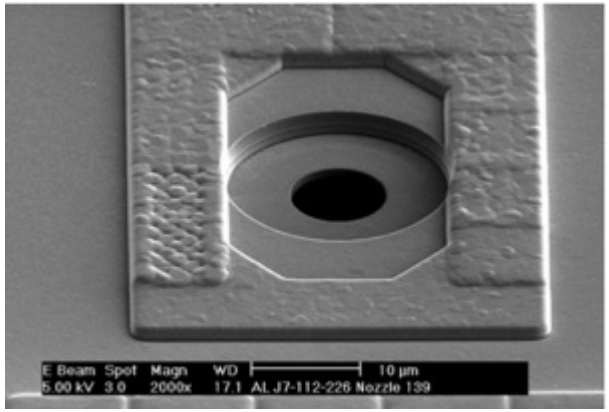
- pumpa (pl. kapilláris)
- szelep

- filter
- mixer
- szeparátor
- reaktor

- szenzorok ⇨ **Lab-on-a-Chip**

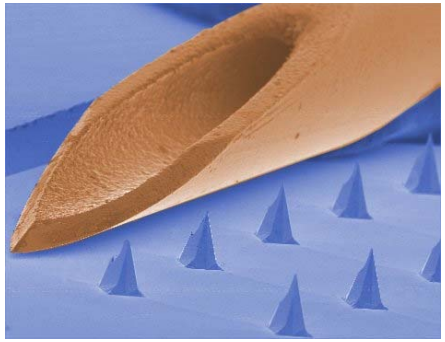
MIT

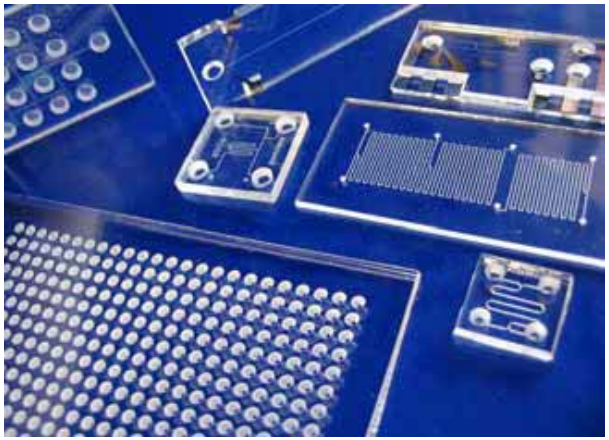




Kodak - 2008

Tyndall



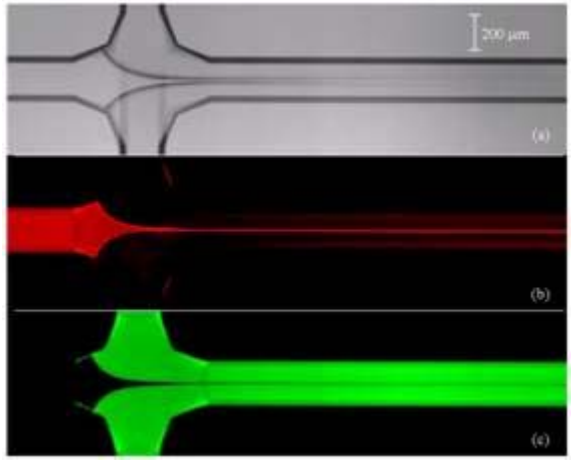


Micronit

MIKROFLUIDIKA

folyadékok manipulációja mikrométeres skálán

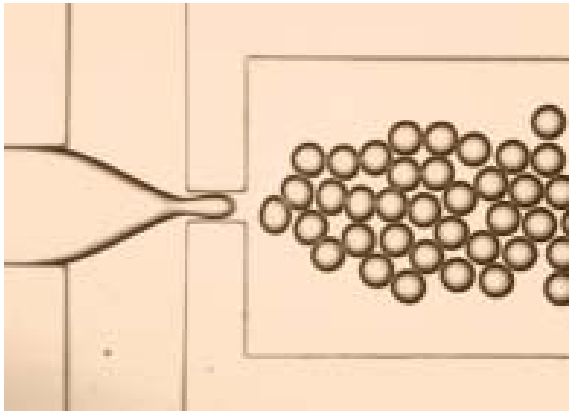
FOLYTONOS mikrofluidika



Flow focusing geometry (MML)

KÉT (vagy több) FÁZISÚ mikrofluidika

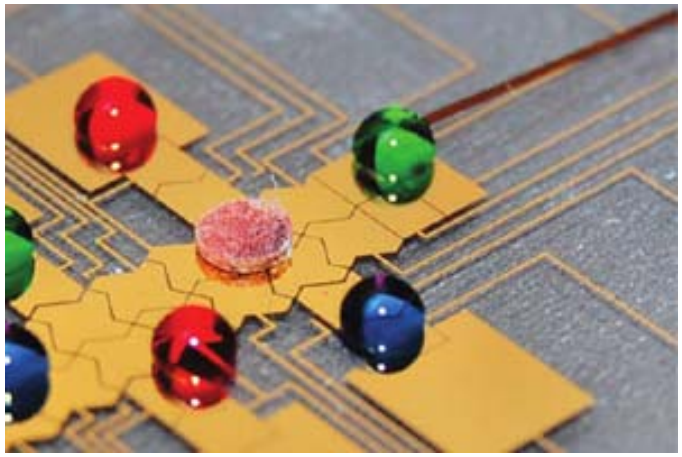
különböző, nem keveredő folyadékok vagy folyadék-gáz elegyek egymástól határozott fázishatárral elválasztott áramlása



Droplet generation (Twente)

DIGITÁLIS mikrofludika

elektrowetting



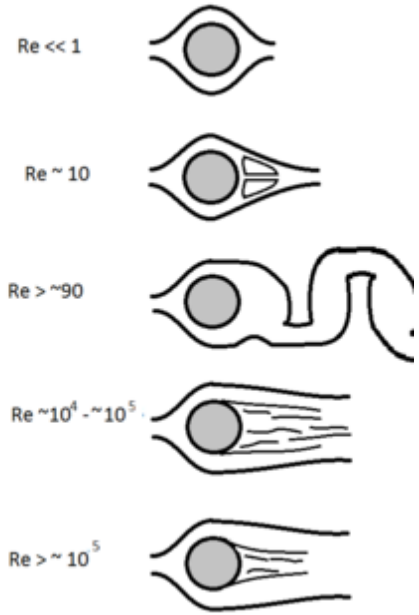
FOLYTONOS MIKROFLUIDIKA

folyadékok (gázok) manipulációja mikrométeres skálán

- Folytonos közelítés (Newtoni folyadék)
- Lamináris vs. keresztirányú vagy turbulens áramlás
- Reynolds szám
  az alacsony Reynolds szám pl. akadályozza a keveredést
- Diffúzió

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

ρ a folyadék sűrűsége,
V az átlagos sebesség,
D a kör keresztmetszetű cső átmérője
μ a folyadék viszkozitása



Folyadék kinematika

- Tér reprezentáció

$$v = u(x,y,z,t)\bar{i} + v(x,y,z,t)\bar{j} + w(x,y,z,t)\bar{k}$$

ahol *u, v, w* a sebességvektor *x, y, z* komponensei, *t* az idő

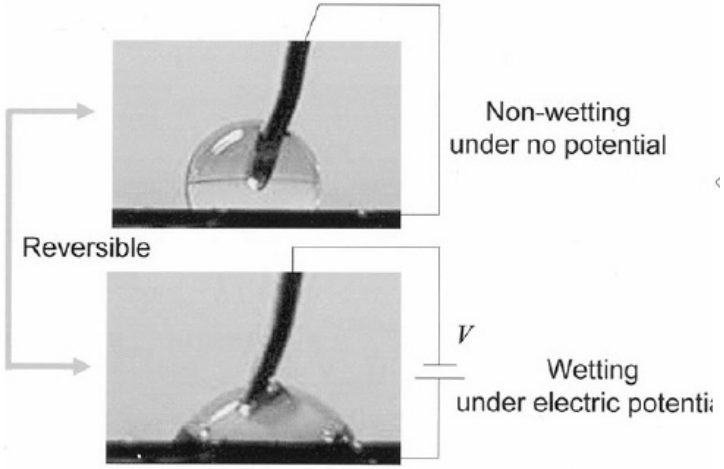
Felület / térfogat arány ⇨ növekvő felületi erők

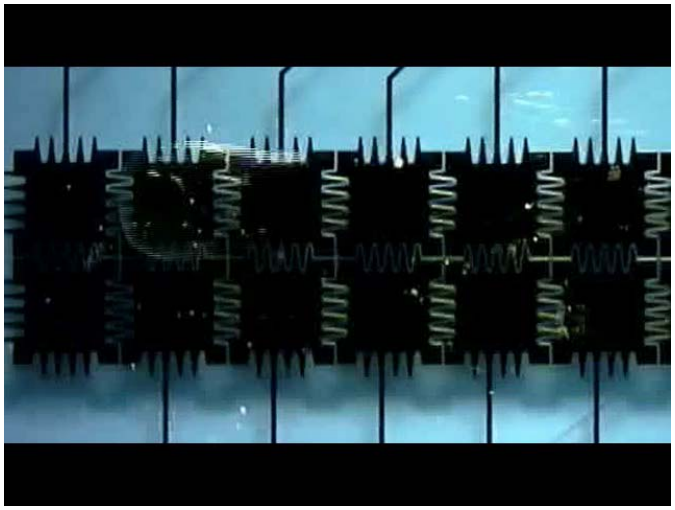
DIGITÁLIS MIKROFLUIDIKA

electrowetting: elektromos potenciál hatása a víz felületi kontaktszögére

$$\cos\theta(V) - \cos\theta(0) = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{2\gamma_{LG} t} V^2$$

θ a kontaktszög,
V az elektromos potenciál,
ε_r a szigetelő réteg relatív dielektromos állandója,
ε_0 a vákuum dielektromos permittivitása (8.85 x 10^{-12} F/m),
t a szigetelő réteg vastagsága.

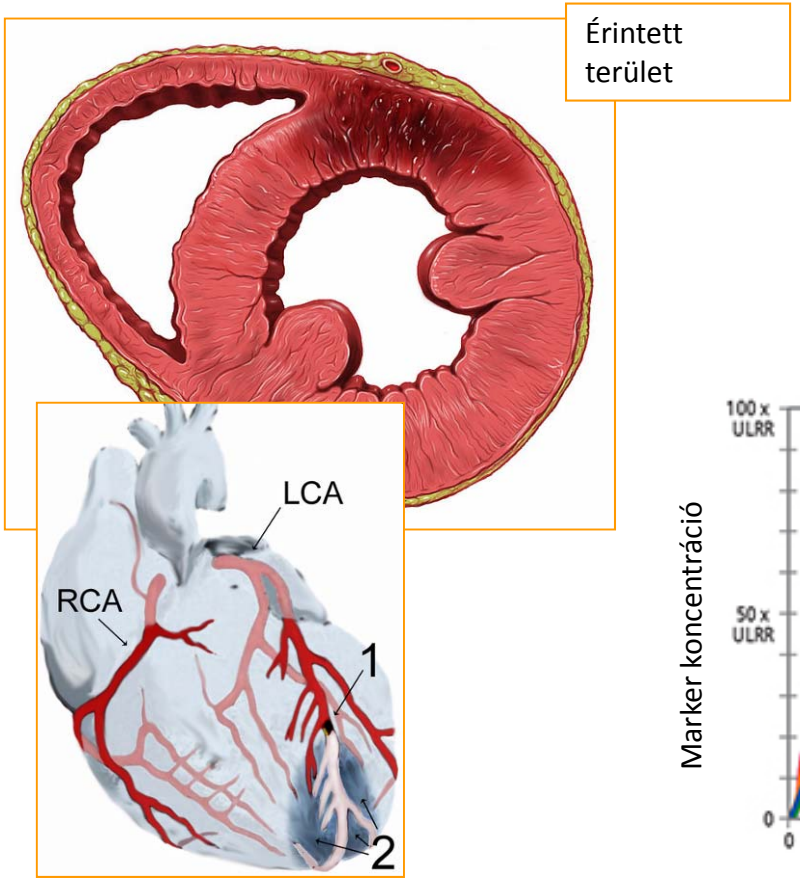




MEMS / NEMS: Orvosdiagnosztikai alkalmazás

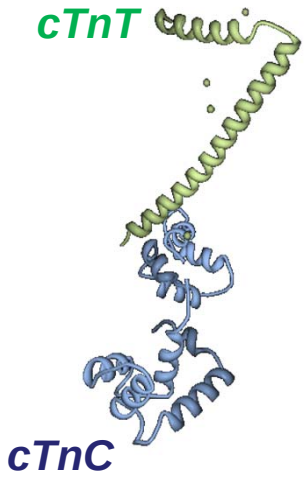
Szívinfarktus – szívelégtelenség – gyulladás

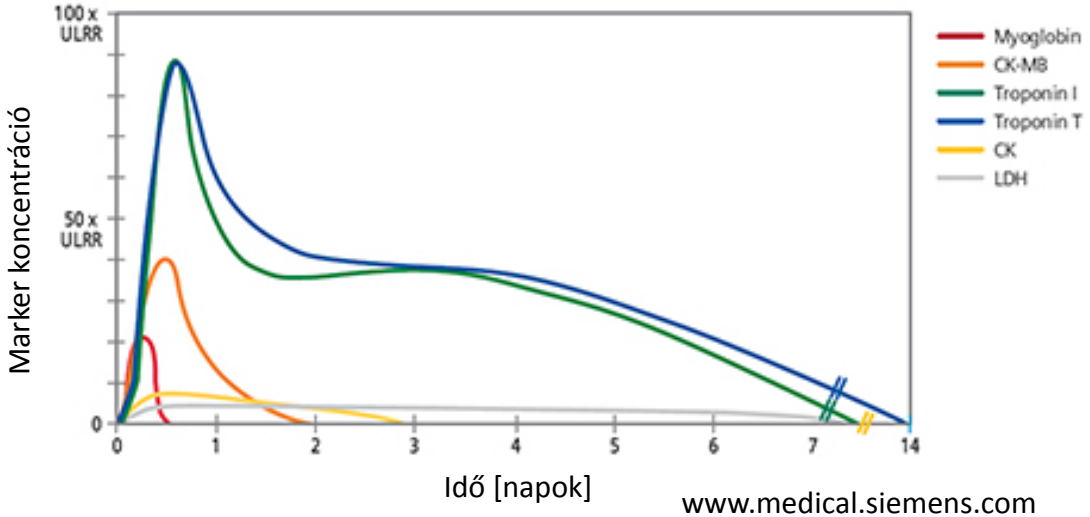
A szív vérellátásában bekövetkező elégtelenség



Kardiológiai biomarkerek:

cTnT/cTnI: Troponin T / Troponin I
CK-MB: kreatin-kináz enzim
Myoglobin: citoplazmatikus oxigén kötő fehérje
BNP: B típusú átriális natriuretikus peptid
NT-proBNP: N-terminális BNP
CRP: C-reaktív fehérje





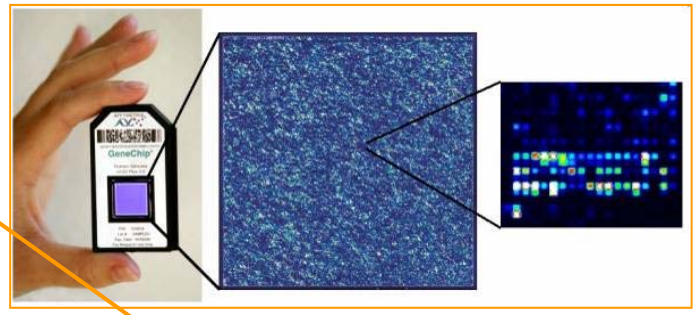
www.medical.siemens.com

Point-of-Care diagnosztikai eszközök

szív és érrendszeri problémák

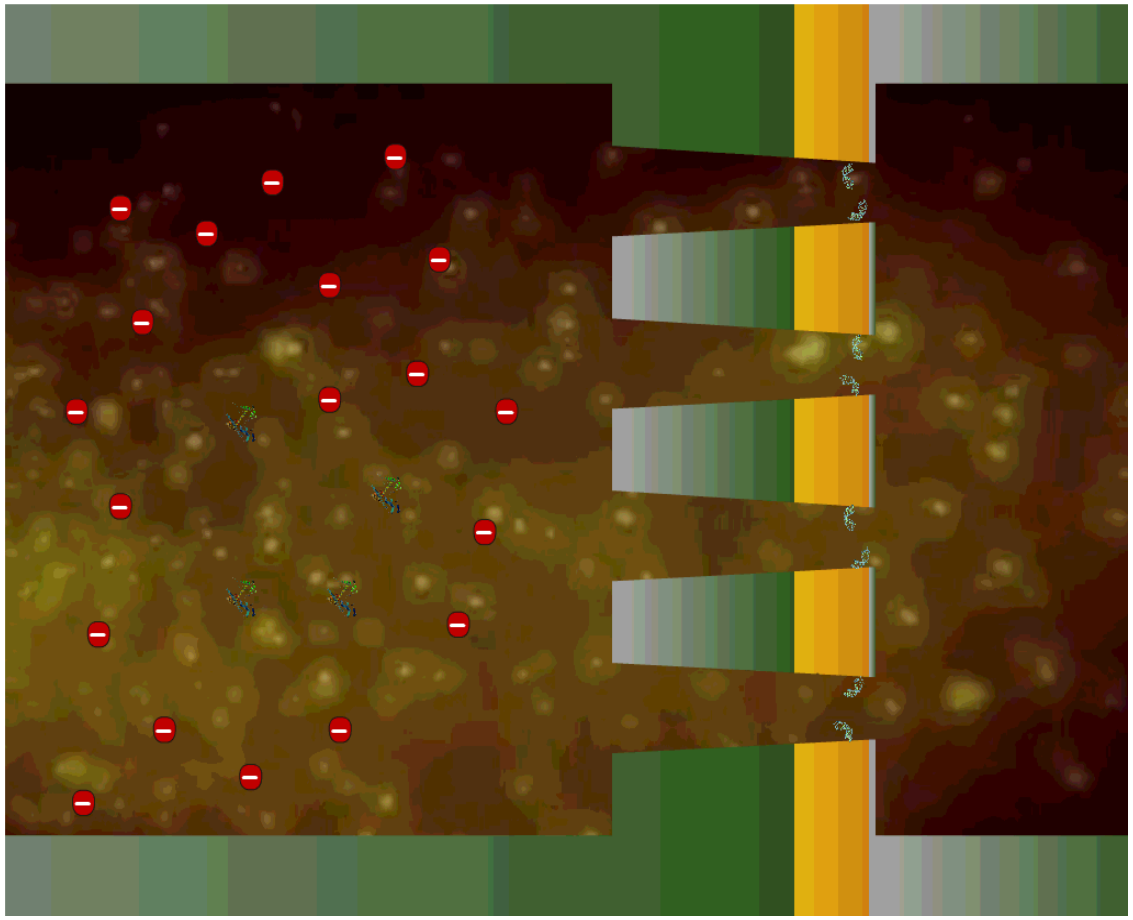
State-of-the-art (2014):

- SPR (Bio-Rad, Biacore – GE Helthcare)
- Optikai jelöléses (Affymetrix, Alere - Triage)
- Electrokémiai (Abbott - i-STAT, Roche - Cobas)

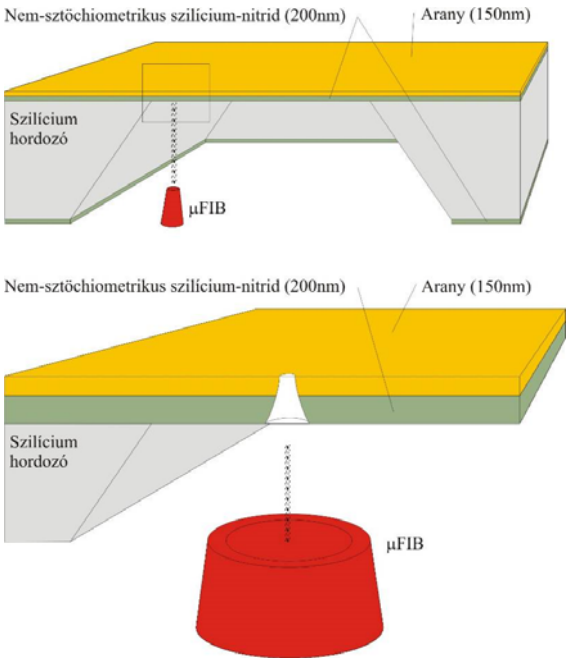


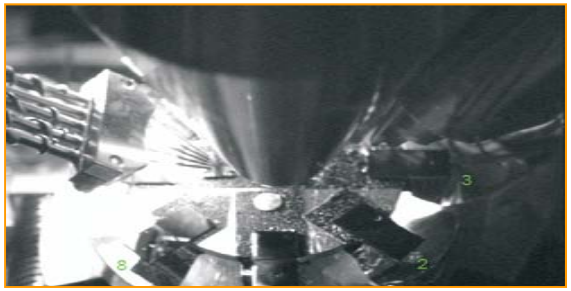
- **EXTRÉM ÉRZÉKENYSÉG, NANO**skálás érzékelő
- **JELÖLÉSMENTES** módszer
- **MULTIPARAMETRIKUS**

Bioérzékelési elv: transzpórus transzportmoduláció



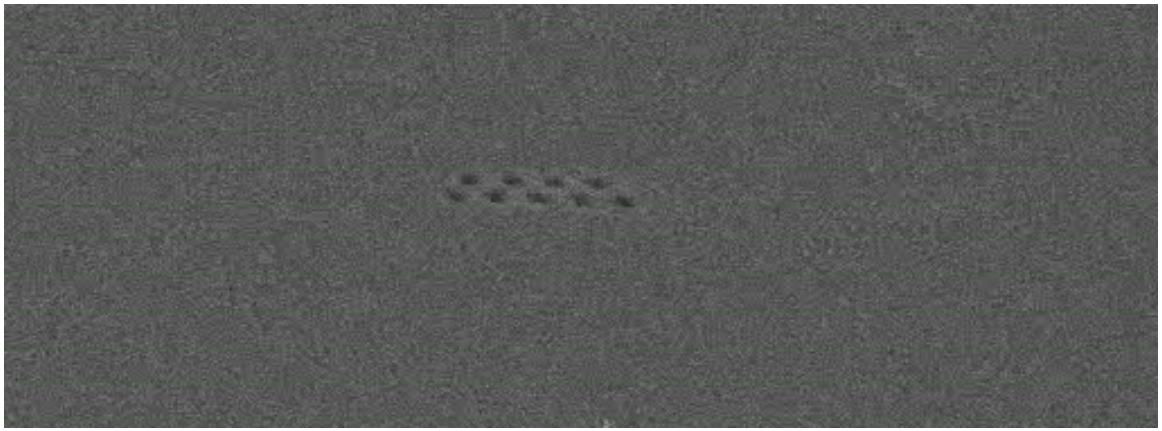
Nanopórusos membrán – nano CNC





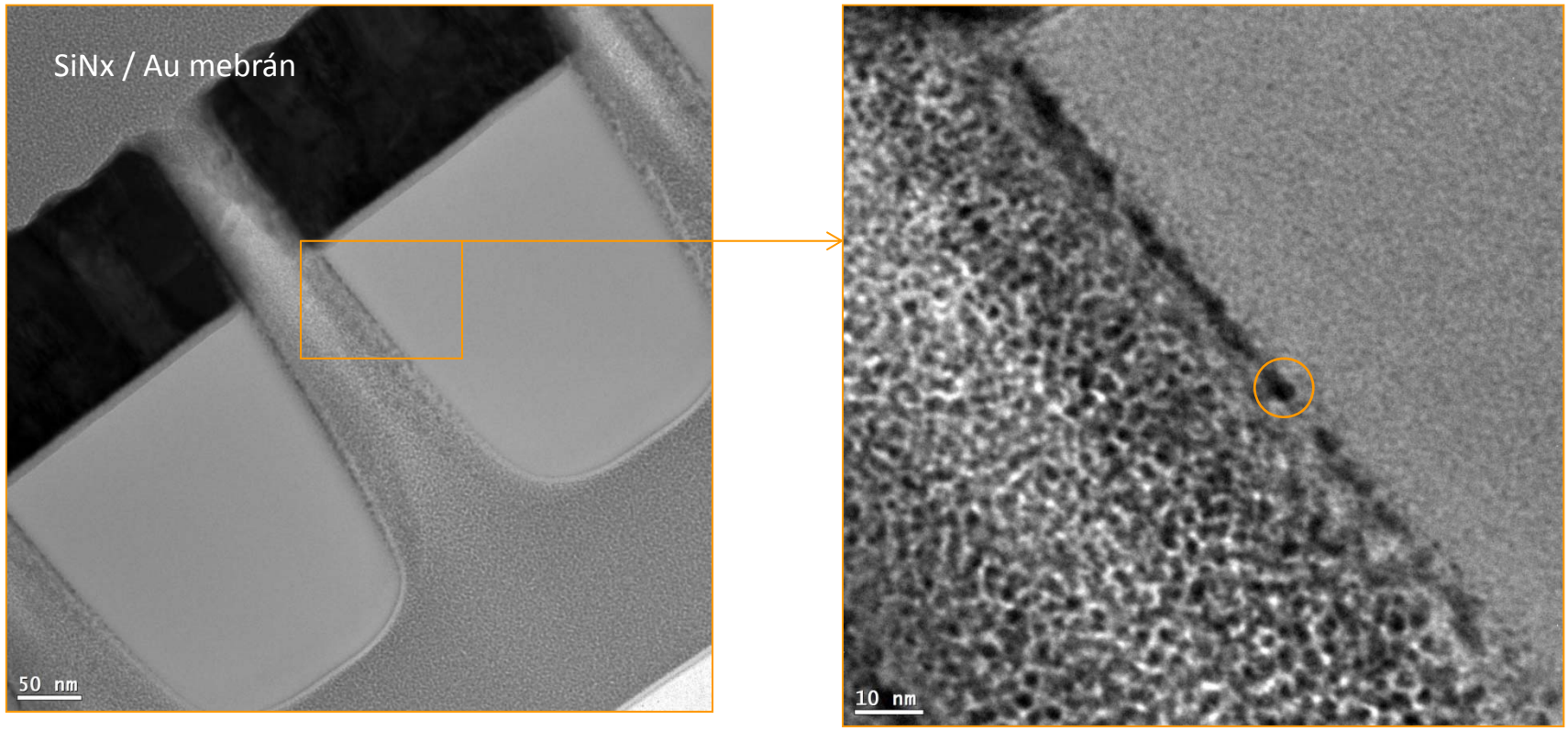
- kiváló elektromos szigetelés és kémiai ellenállóság
- alacsony maradó feszültségek a strukturális rétegekben

	Sztöchiometrikus szilícium-nitrid	Nem-sztöchiometrikus szilícium-nitrid	Termikus vagy CVD szilícium-oxid
Mechanikai feszültség	0,97 – 1,03 GPa (húzó)	alacsony feszültség	-225-275 MPa (kompresszív / nyomó)
Kémiai ellenállóság	Stop réteg KOH számára	Stop réteg KOH számára	KOH: 7-8 nm/min Stop réteg DRIE számára
A membrán DC ellenállása	-	kb. 3×10^{10} Ohm	kb. 2×10^{11} Ohm



Nanopórusok szerkezete

XTEM felvétel a nanopórus belsejéből (sötét Au réteg a plazmon képen), visszaporlódott Au nanorészecskék a SiN_x felületén

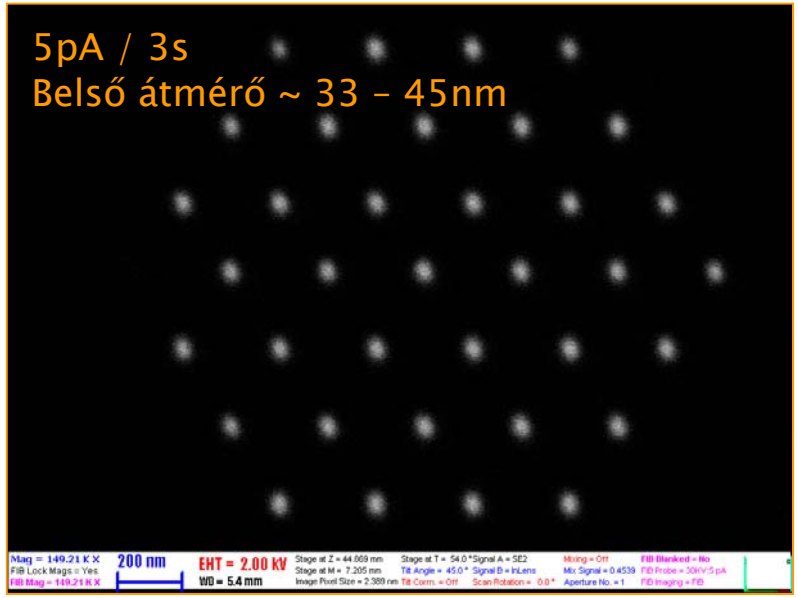


Reprodukálható / kontrolált nanopórus geometriák

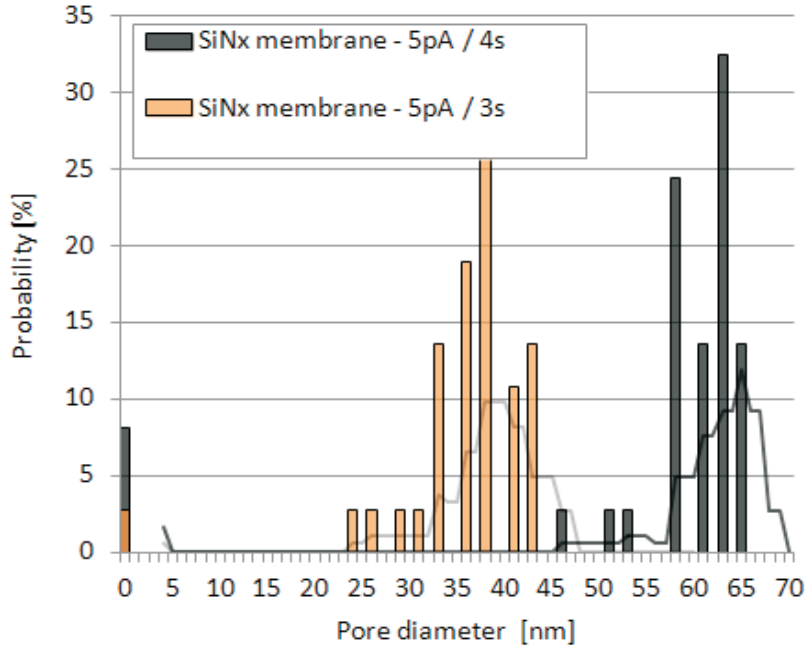
a célmolekula méretéhez igazítva

Nanopórus mátrixok (1-7-37 pórus / membrán)

- Fókusz instabilitás a vezérelt fúrás során
- SiN_x membrán



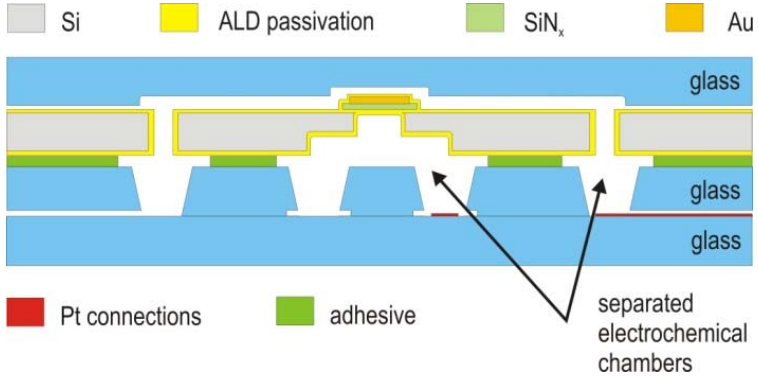
Több, mint 100 nanopórus statisztikája, számos nem átmenő

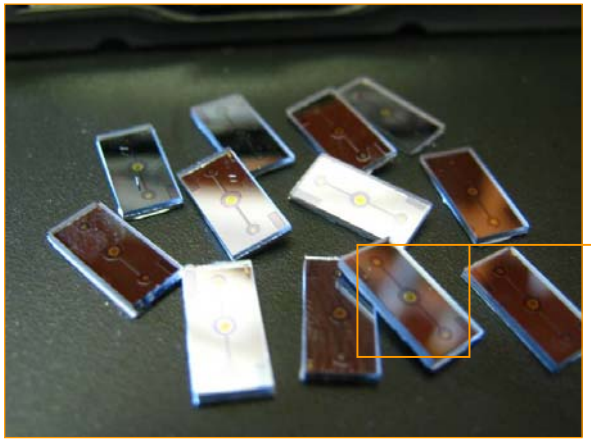


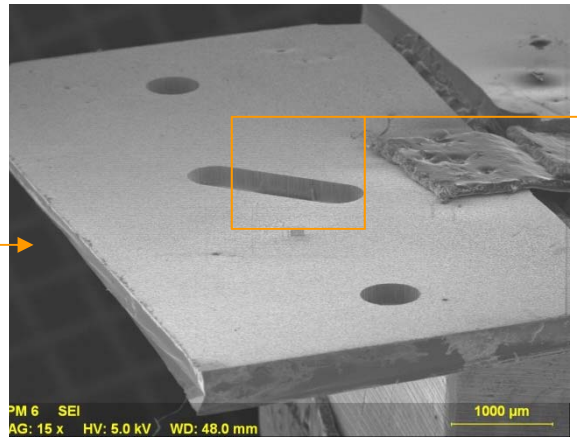
Mikrofluidikai integráció

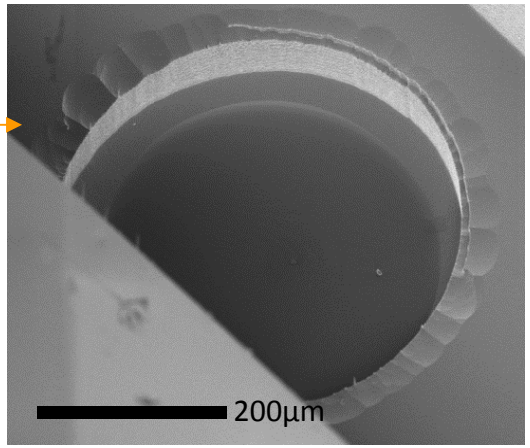
Mikrofluidikai integráció

- **Fluidikusan integrált** nanopórus membránok
- Egyedi és **multiplexált fluidikai architektúra**
- A nanopórus alapú érzékelő fluidikai **/ elektromos címzése**
- **Integrált plazma filter**



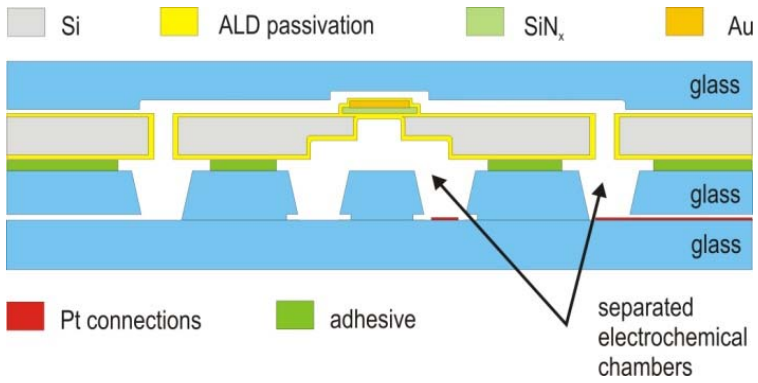


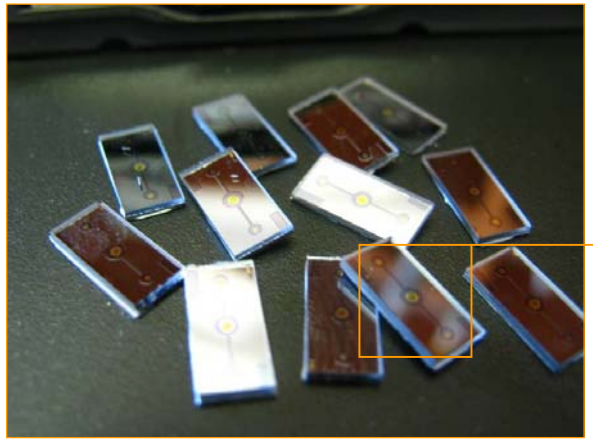


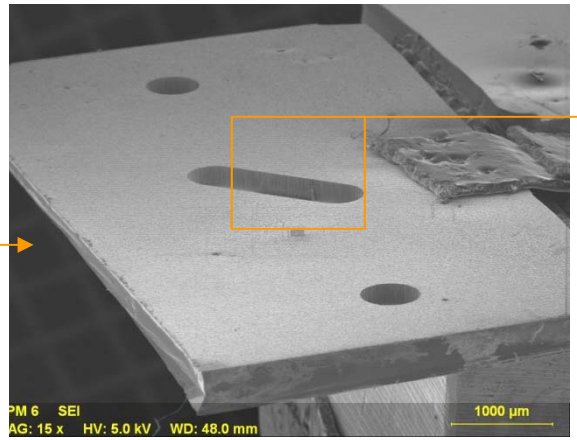


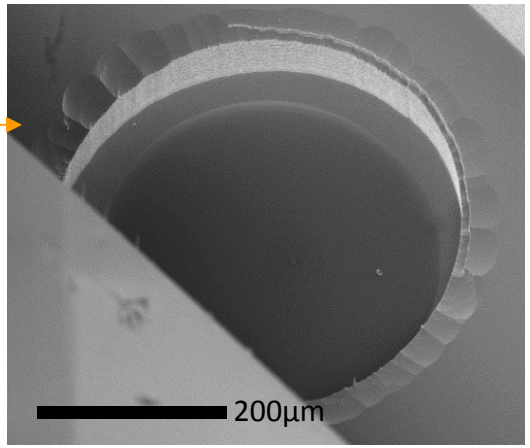
Az integrált nanopórus szerkezet kialakítása

- MEMS technológia: DRIE
  szilícium viák és membrán
- A szilícium és üveg szerkezet anódikus kötése
- **Elektromos passziváció**
  ALD AlOx / TiOx réteg leválasztásával
- FIB nanopórus fúrás
- Illesztés a mikrofluidikai kazettába (Micronit)



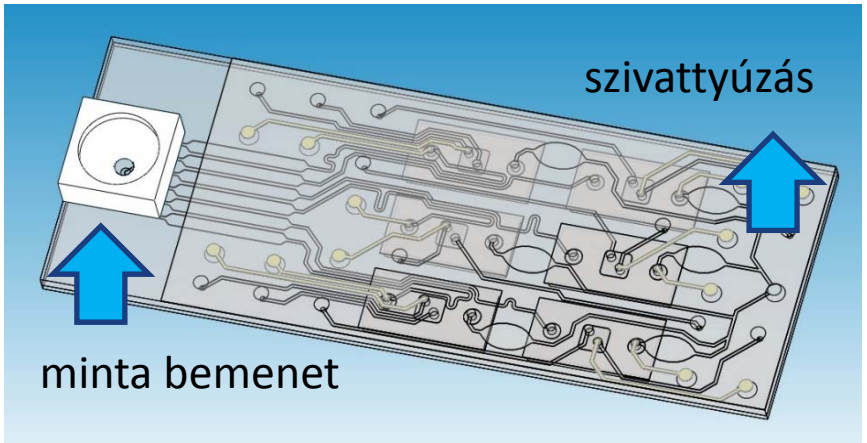


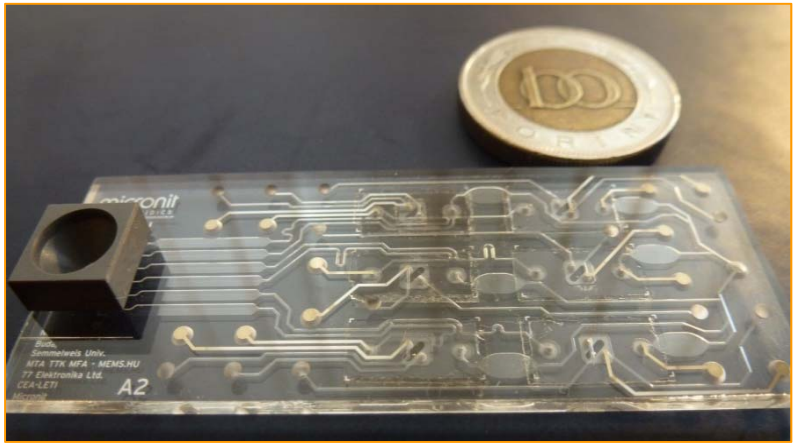


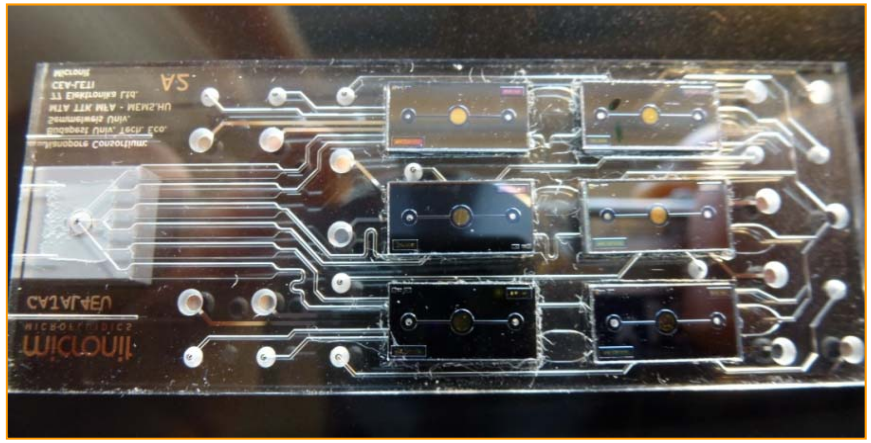


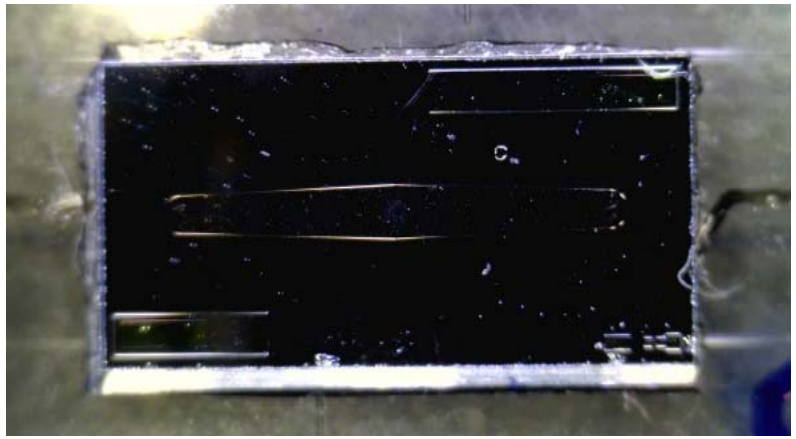
Mikrofluidikai kazetta – összeszerelés és csatlakoztatás

Multi-csatornás (6) mikrolfuidikai szerkezet

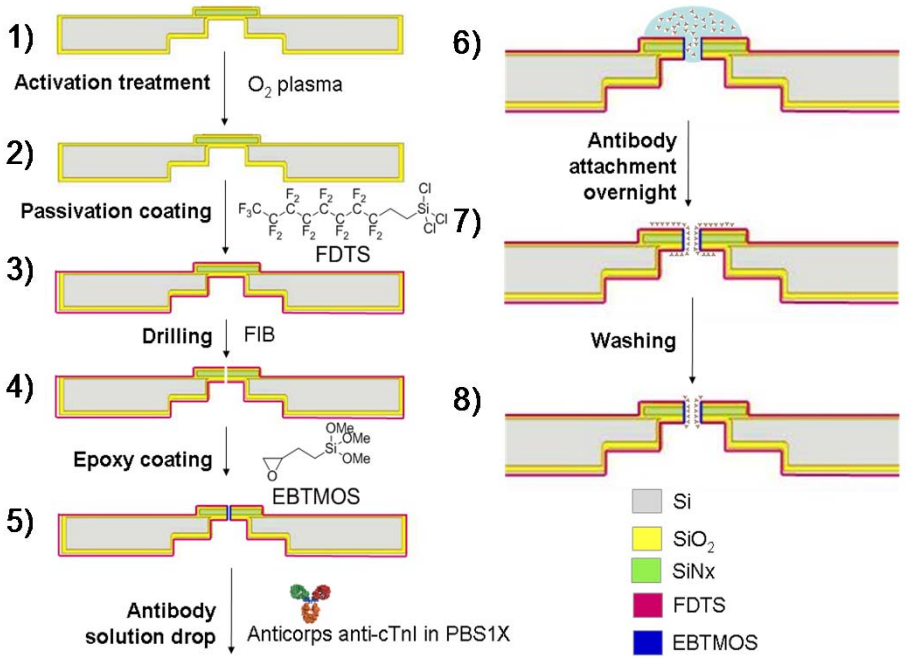


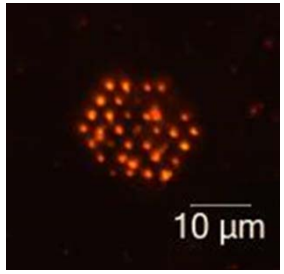




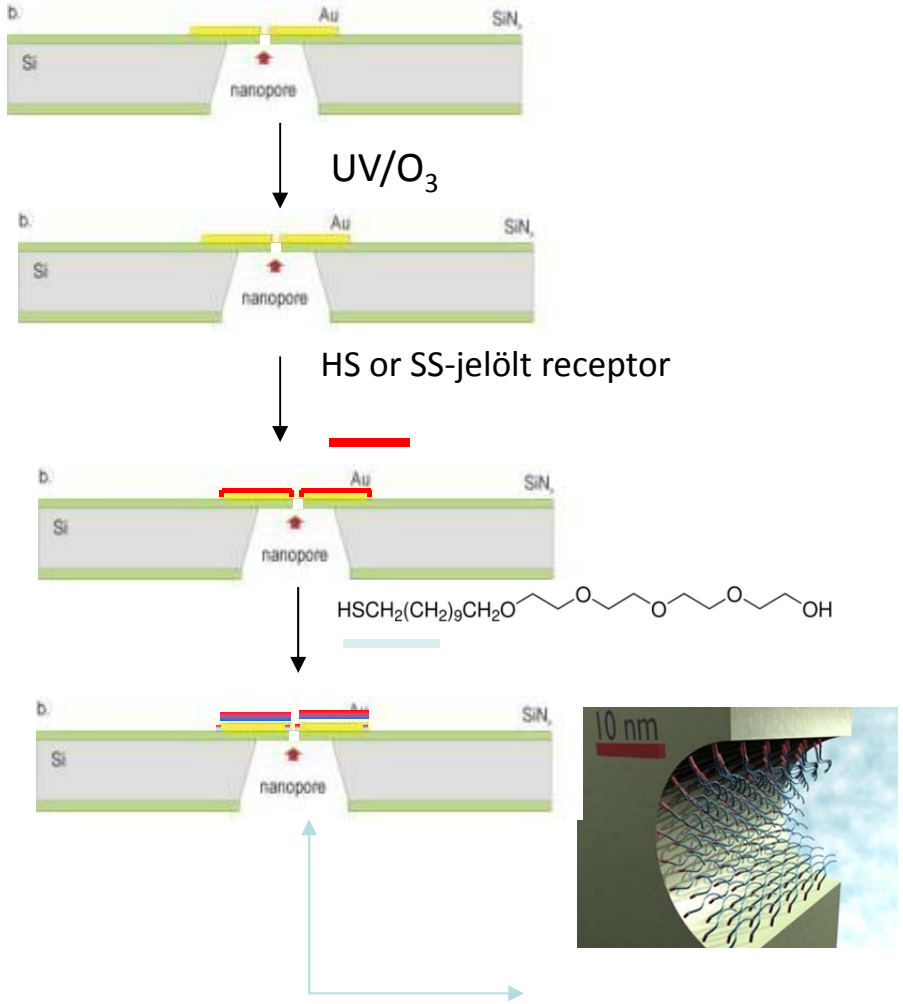


SiNx és SiNx / Au nanopórus membránok funkcionalizálása

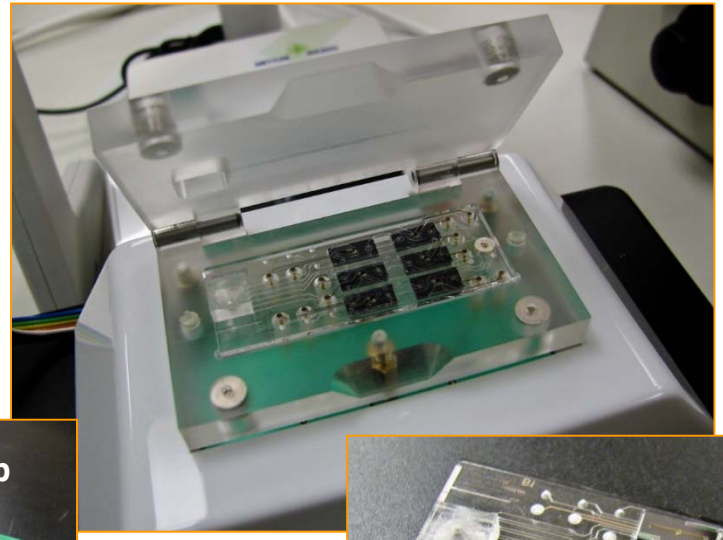


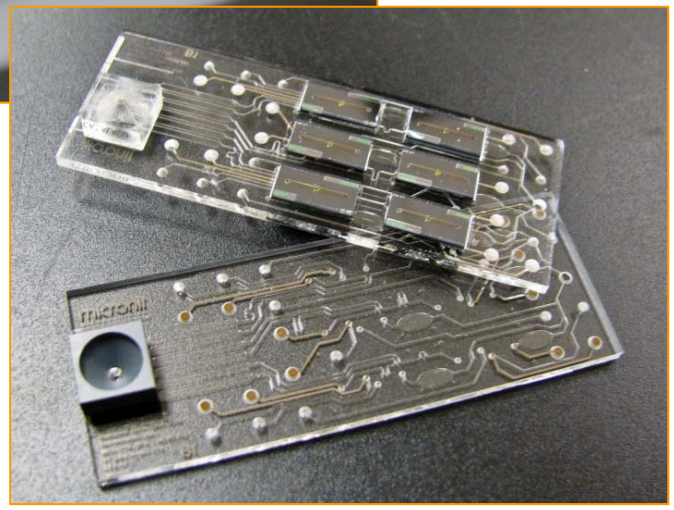


Fluoreszcensen jelölt receptor molekulák
Bekötődése a pórusokban

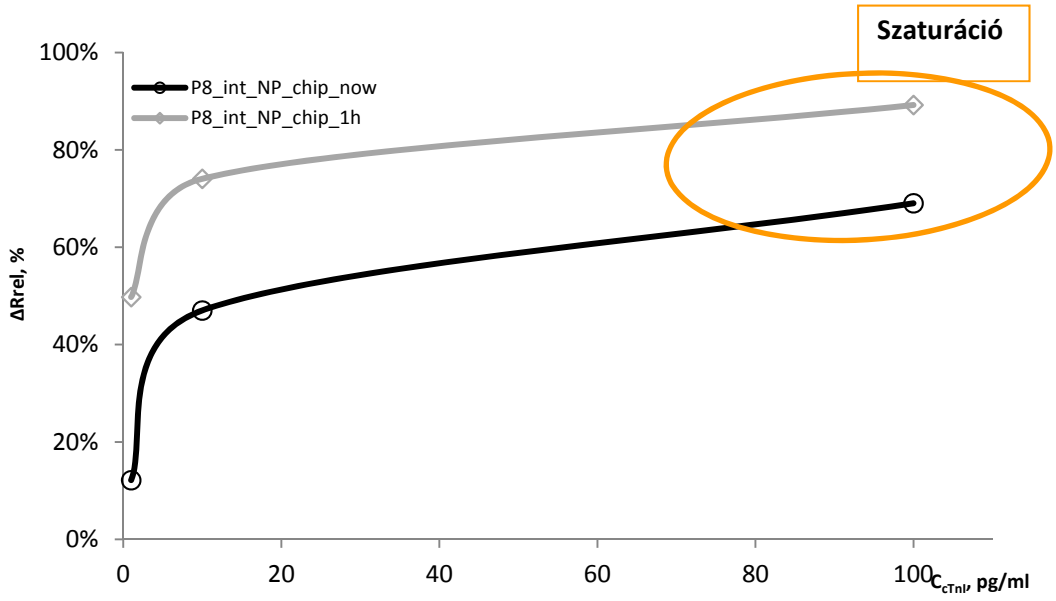


Rendszer integráció – SYSTEM INTEGRATION





Validáció: humán kardiális Troponin I (cTnI) bekötődés (asztali impedancia spektroszkóppal (Gamry) mérve)



- Receptor:
  cTnI specifikus aptamer
- Pórus átmérő:
  ~ 50 nm ± 10 %
- Pórusszám : 64
- Alappont:
  cTnI mentes szérum

Érzékenység: 1pg/ml!

Klinikai tartomány!

Problémák:

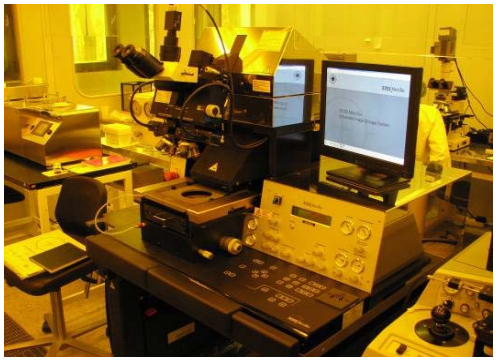
- Keskeny dinamikai tartomány: szaturáció 100 pg/ml-nél
- Tökéletlen nedvesítés!

A Cajal4EU ENIAC Projekt céljainak és eredményeinek összevetése

Cél	Célérték	Eredmény	
Gyors diagnózis	~15 min	~3 min/nanopórusos chip* ~18 min/mikrofluidikai kazetta*	
Multiplexálhatóság	Max. kapacitás: 6 csatorna Markerek száma: 3	maximum kapacitás: 6 2 markerre tesztelve (cTnI, miRNA)	
Érzékenység	Femtomoláris tartomány (fM)	**~ 50fM (pg/mL troponin I esetén)** gyors telítődés magasabb koncentrációk esetén: limitált dinamikai tartomány alacsonyabb pórusszámok esetén!	
Minimális mintamennyiség	~10 – 50 µl	8.5 µl – szérum 17 µl – teljes vér	
Alacsony ár	1 – 5 $ kazettánként	R&D szinten lehetelen… Technológia-fejlesztés szükséges!	
Autonóm működés	Az összes mintapreparációs funkció egy chipen integrálva	Részben teljesül… (a filter modul áttervezése szükséges)	
Nincs erősítés	Jelölésmentes	**Jelölésmentes EIS kiolvasás**	

INTRO MTA EK MFA

INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – MTA EK MFA



MEMS labor:
300+150 m^2 clean room (4inch wafers) - 1µm felbontású maszkkészítés (Heidelberg laser PG & direkt írás),

Maszkillesztő / nanoimprinting rendszer (Karl Süss MA 6, Quintel),
DRIE (Oxford Instruments Plasmalab 100),
Fizikai és kémiai rétegleválasztások
(párologtatás, porlasztás, 2x4 diffúziós cső, LPCVD, ALD),
Wafer bonder (Karl Süss BA 6), ion implanter, etc.

Nanoskálás megmunkálás és karakterizáció:
E-BEAM, FIB, SEM, TEM, AFM, XPS, EDX, Auger, SIMS

RAITH 150 E-BEAM
Direct írás / maszkgyártás
Ultra nagy felbontás (8nm)

Zeiss-SMT LEO 1540 XB SEM, Canion FIB nanoprocessing system
SEM és fókuszált ionnyaláb (FIB),
Gáz injektáló rendszer (GIS) (EBAD, IBAD)
és Energia Diszperzív Spektroszkóp (EDS)