

# Mikro-elektro-mechanikai szerkezetek – MEMS

A mikro-elektro-mechanikai rendszerek (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS) mechanikai és elektronikus elemek közös hordozón való megvalósítása.

Az elektronikus elemek a szabványos integrált áramkör gyártási technológiákkal (CMOS, bipoláris, BiCMOS), a mikromechanikai elemek pedig ezekkel összeférhető technológiai lépésekkel készülnek. A mikromechanikai elemek technológiája illeszkedik a mikroelektronikai elemek előállítási technológiájához.

**'70-es évek vége:** mikroprocesszorok fejlődése

olcsó személyi számítógépek kulcstechnológiája

**'80-as évek vége:** olcsó szilárdtest-lézer tömeggyártása

internetes kommunikáció kulcstechnológiája

**'90-es évek vége:** mikrorendszerek fejlesztése

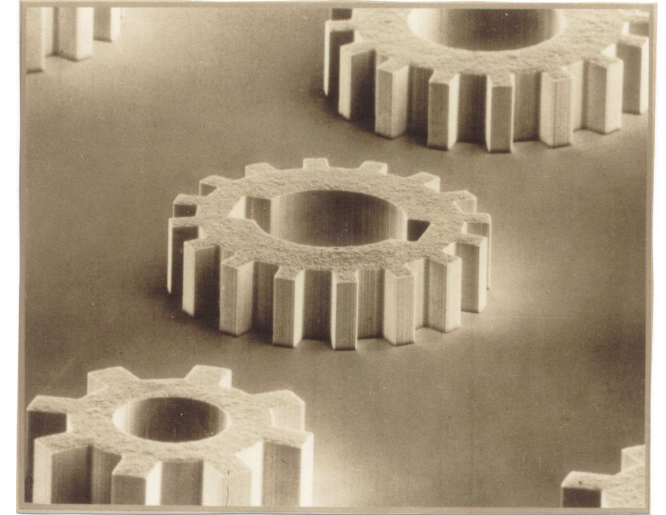
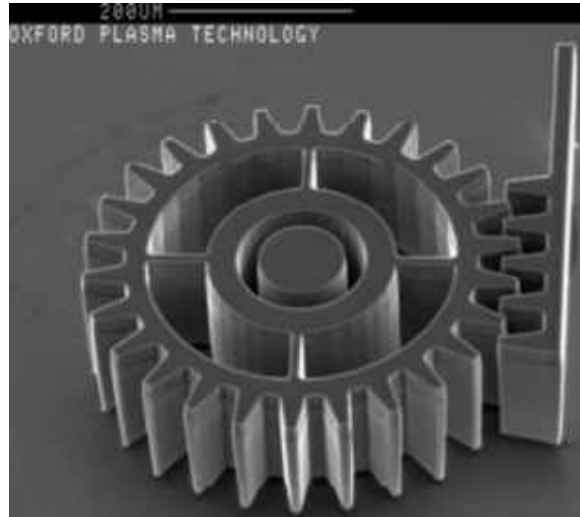
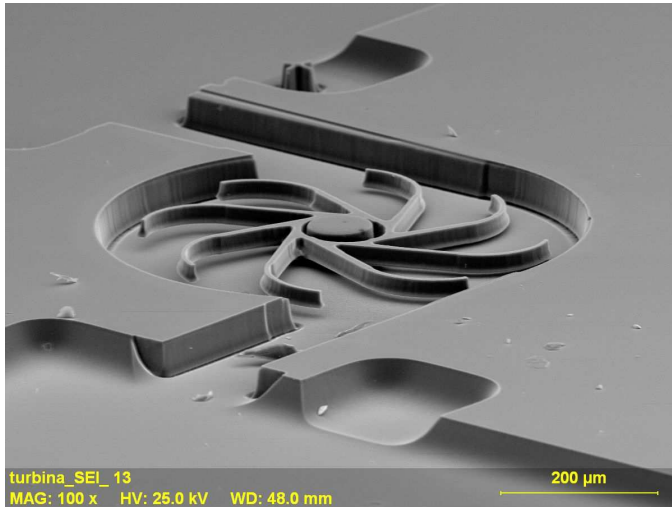
érzékelők a valós idejű monitorozás és vezérlés számára

**'00-es évek:** MEMS/MOEMS: Micro-(Opto-)ElectroMechanical Systems

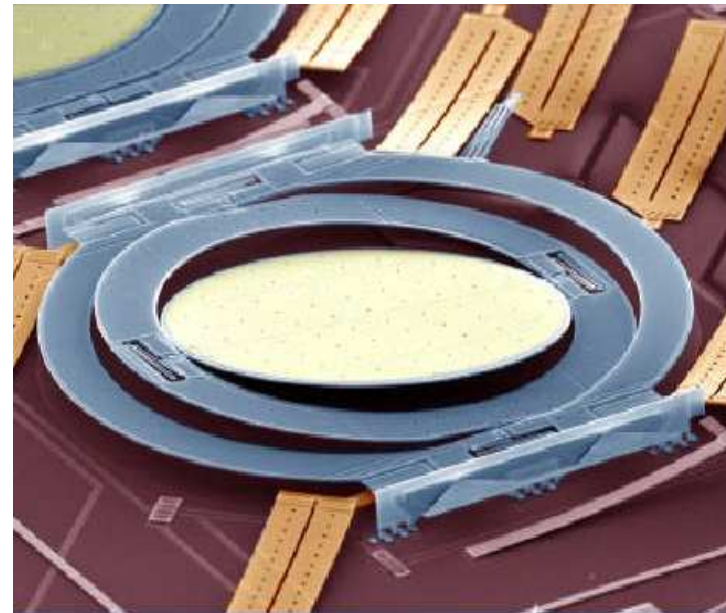
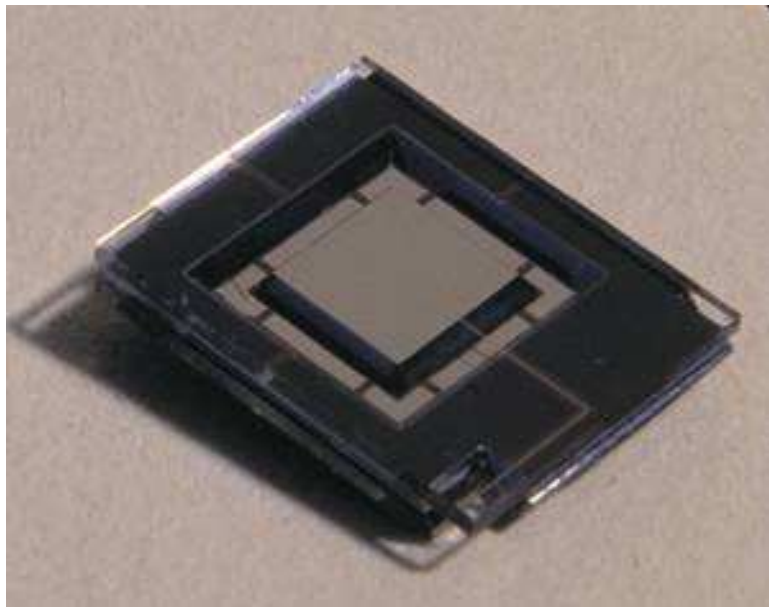
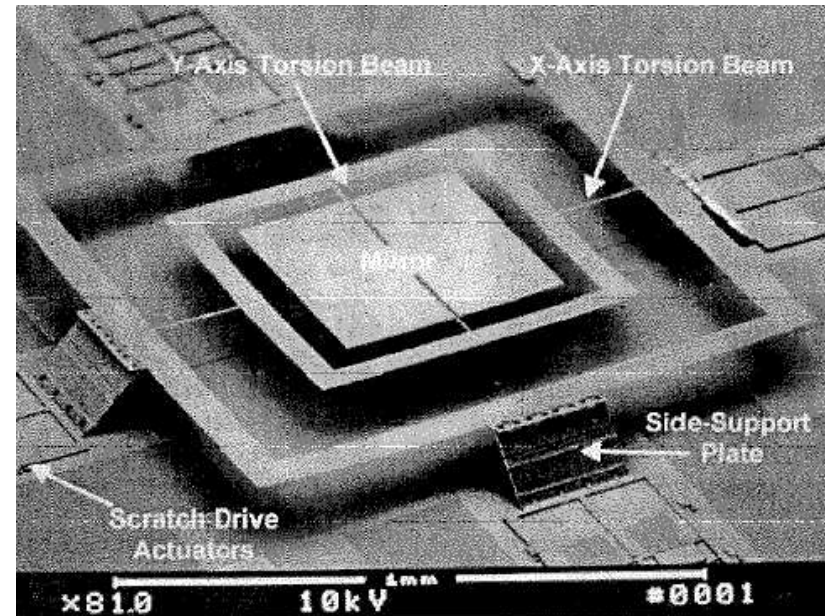
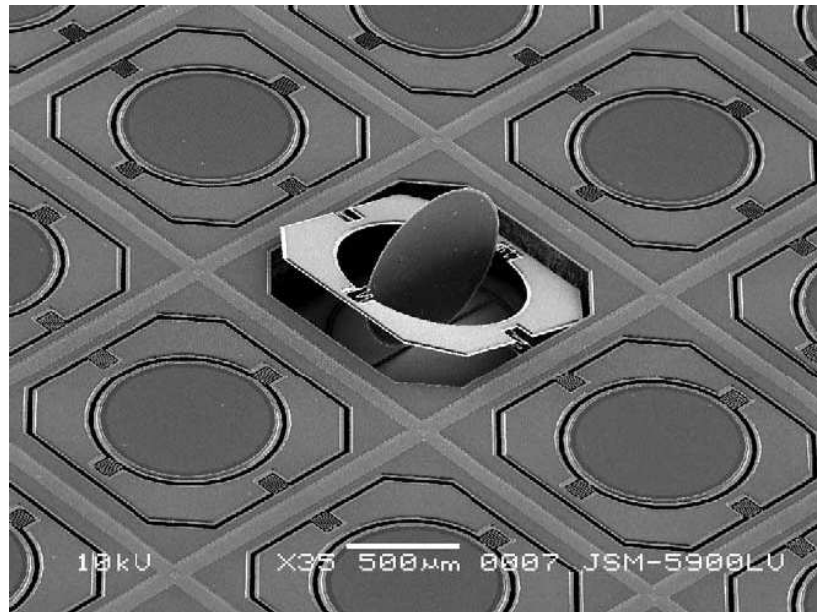
A területen dolgozó szakemberek szerint a MEMS eszközök forradalma zajlik, hatalmas és gyors a fejlődés.

# **MEMS szerkezetek**

*Turbinák, fogaskerekek*



## Felfüggesztett mikrotükrök



## Érzékelők a személygépkocsiban

Motor- és futóművezérlés, diagnosztika, élet- és menetbiztonság, kényelem.



# **MEMS eszközök sajátosságai**

- nagy rendszer-változások vezérlése kis erővel;
- minőségi előnyök a méretcsökkentés révén, új működési elvek realizálása;
- csoportos (batch) megmunkálás, az eszközök integrálása IC-ben;
- tetszőleges funkciók társítása: érzékelés, számítás, aktuálás (beavatkozás), vezérlés és kommunikáció;
- az ezeket megvalósító eszközök integrálása egy rendszerben: erőforrás (telep, tápegység), antenna, érzékelők, beavatkozók, stb.;
- alapvetően felületi-, rétegtechnológiai realizálás;
- a chip és a tok közösen valósítja meg az adott funkciót;
- a MEMS eszköz árképzése: a chip 0,1-50%, a tokozás akár 50-99%.

## **Előnyök:**

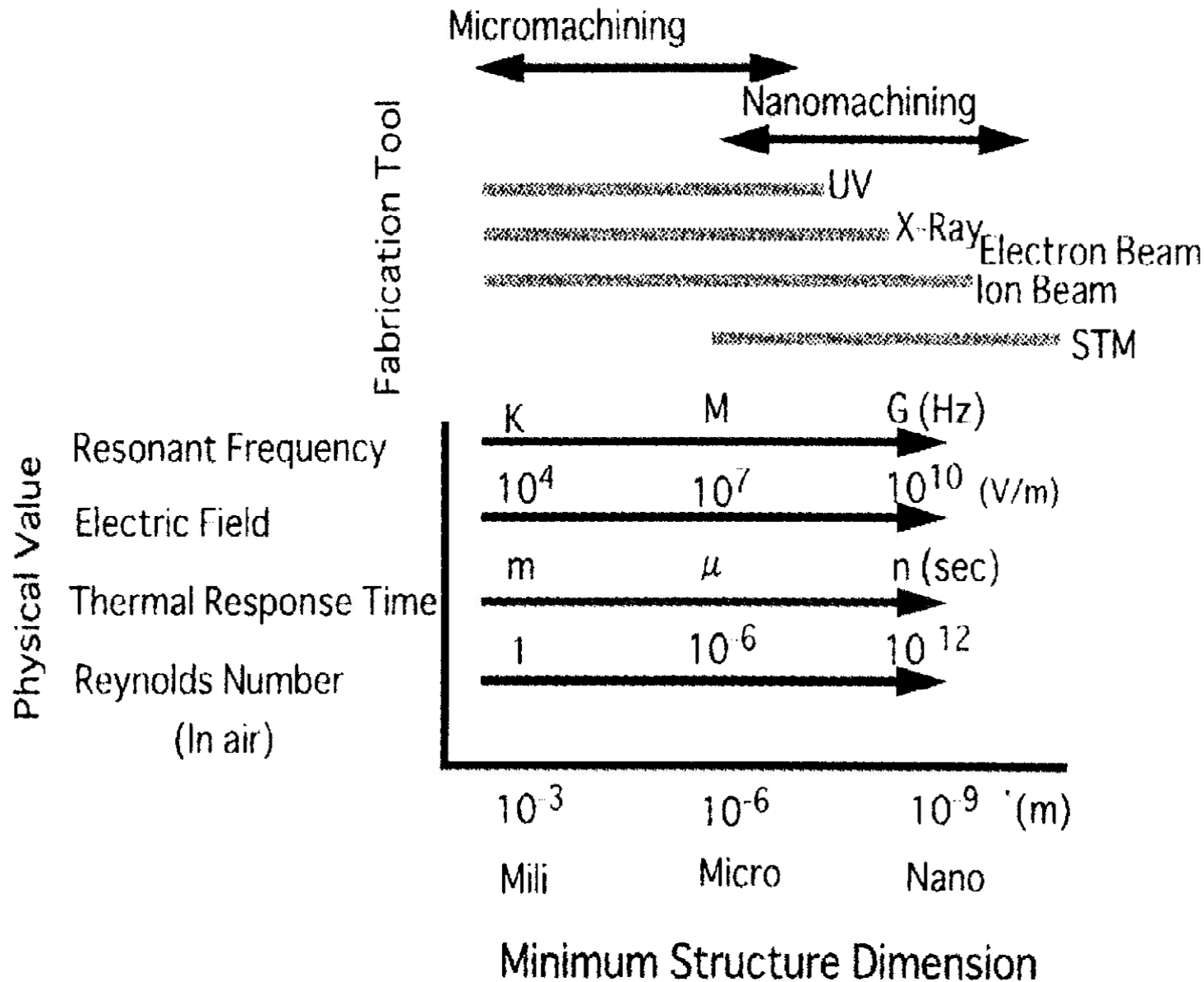
kis tömeg  
nagy felületi érzékenység  
kis tehetetlenség

Alkalmasak kis tömegű (mennyiségű) minták analízisére

Perspektivikus lehetőség: működtetés az emberi szervezeten belül (külvilág felé vezeték nélküli kapcsolat).



# A MÉRETCSÖKKENTÉS HATÁSAI



*A mikro-mechanikai eszközökben az arányos méretcsökkentés révén várható előnyök:*

a rezonancia frekvencia,  
az elérhető elektromos tér,  
a termikus válaszidő,  
a folyadék-mechanika (Reynolds szám levegőben ) vonatkozásában.

## **MEMS eszközök**

Érzékelők

Beavatkozók

Optoelektronikai eszközök, elemek

Passzív RF komponensek

*Érzékelők*

Mechanikai érzékelők

Nyomásérzékelők

Gyorsulásérzékelők

Rezgésérzékelők

Giroszkópok

Dőlésszög-érzékelők

Mikrofonok

Ultrahangérzékelők

Áramlásérzékelők

Termikus érzékelők

Mágneses érzékelők

Kémiai érzékelők

Bioérzékelők

*Beavatkozók (aktuátorok)*

Elektrosztatikus szelepek

Mikroszivattyúk

Mikromotorok

Mikrocsipeszek

Mikropozicionálók

*MEMS optoelektronika elemek*

Hullámvezetők, csatolók

Mikrolencsék

Hullámvezető mikrokapcsolók

Mikrotükrök

Mikrokijelző (display) elemek

Optikai rácsok

Mikro(sugár)kapcsolók

Hangolható félvezető lézerek

Fotonikus kristályok

*MEMS passzív RF komponensek*

Változtatható kondenzátorok

Nagy jóságú induktivitások

RF kapcsolók

Antennák

Mikrokapcsolók

# Anyagok

Szilícium, műanyagok, üveg, fémek

Miért a szilícium?

- Kedvező elektromos tulajdonságai mellett a mechanikai és termikus tulajdonságai is nagyon jók
- Sűrűsége kisebb az alumíniuménál
- Nagyon kicsi a hőtágulási együtthatója
- Magas az olvadáspontja
- Kiváló a hővezetőképessége
- Stabil szerkezetek készítésére kiváló
- Kiforrott technológia
- Elektromos és mechanikus elemek integrálhatósága

A Földkéreg 25.7%-át teszi ki, a második leggyakoribb elem az oxigén után.  
Leggyakoribb ásványa a kvarc ( $\text{SiO}_2$ ).





# Mechanikai érzékelők

Mechanikai mennyiségeket (erő, súly, tömeg, elmozdulás, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, folyadék szint, sűrűség, stb.) mérnek.

A mérés közvetlenül a szenzor paramétereire gyakorolt hatáson keresztül történik, ez többnyire szintén mechanikai természetű.

Membrán vagy tartó → deformáció → jelátalakítás

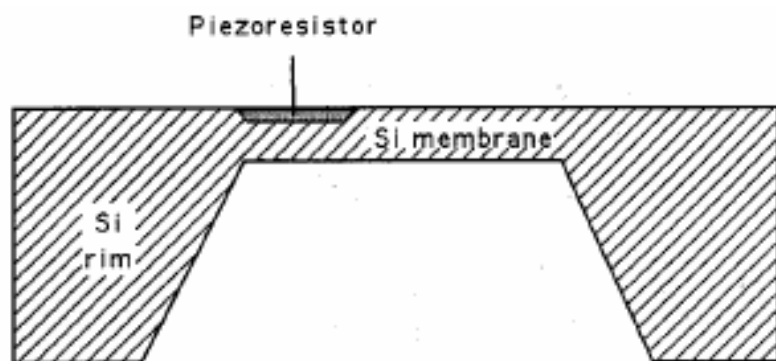
## Csoportosítás:

- A mérendő mennyiség szerint (pl. nyomásmérő, gyorsulásmérő)
- A jelátalakítás módszere szerint:
  - optikai
  - piezoelektromos
  - piezorezisztív
  - kapacitív

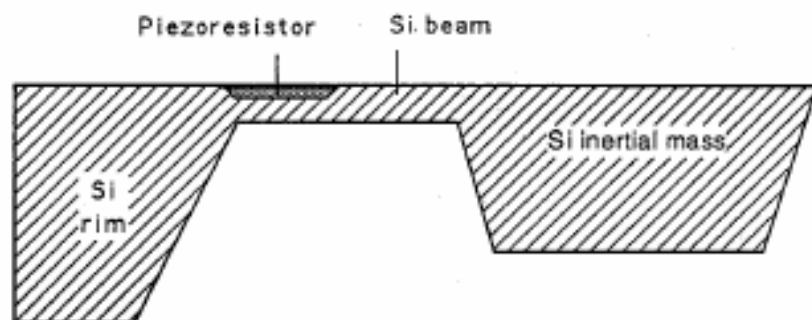
# Si alapú mechanikai érzékelők

## Piezorezisztív érzékelők

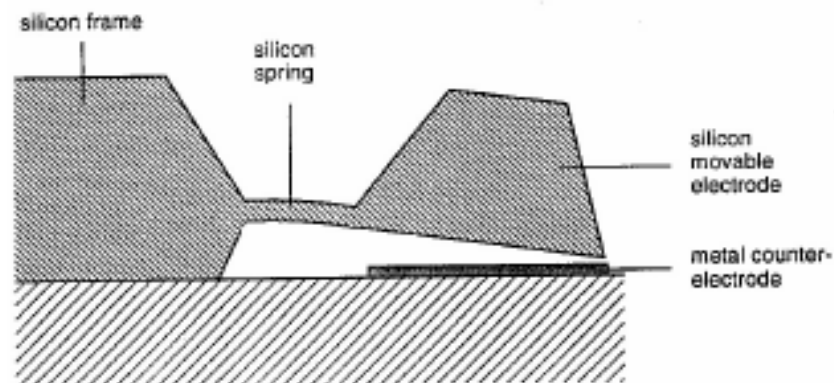
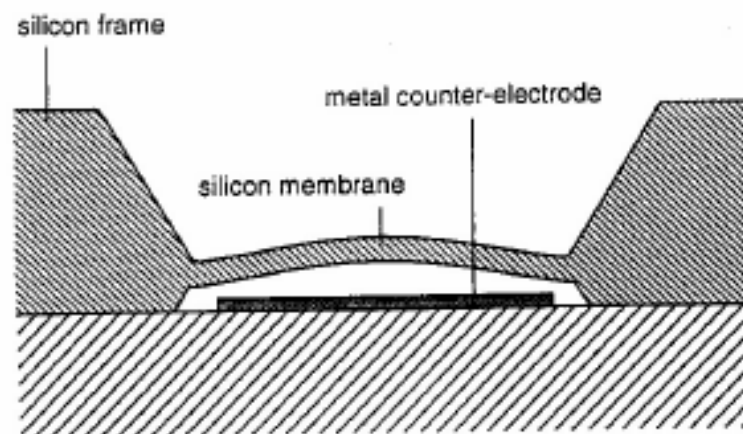
Membrán típusú szenzor:



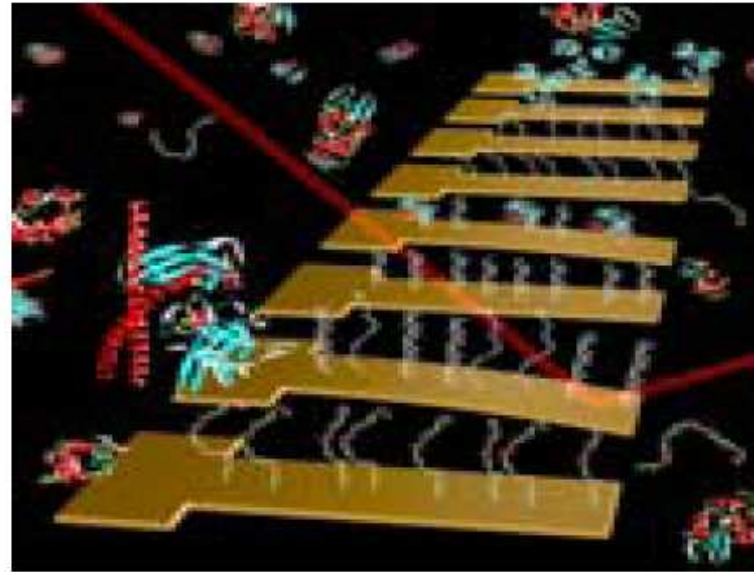
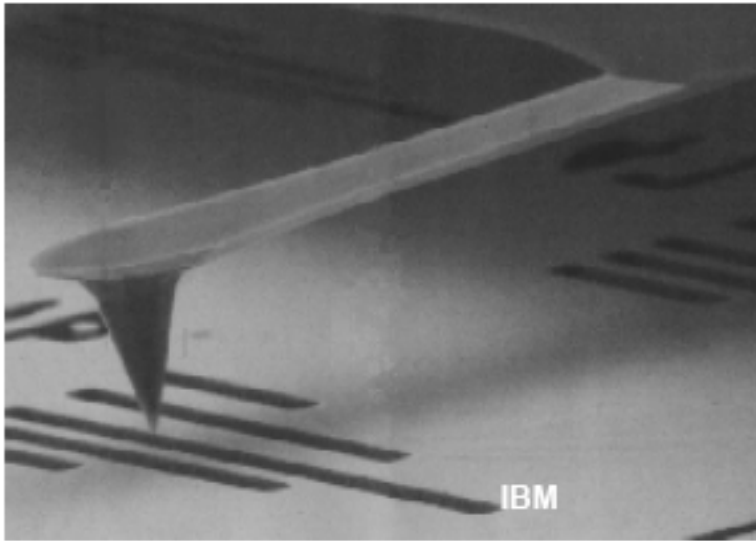
Befogott tartó típusú szenzor:



## Kapacitív érzékelők



# Érzékelő kialakítás és kiolvasás



U Basel

Atomierő mikroszkóp (AFM) tűje: kiolvasás optikailag

*Kapacitív érzékelés előnyei:*

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

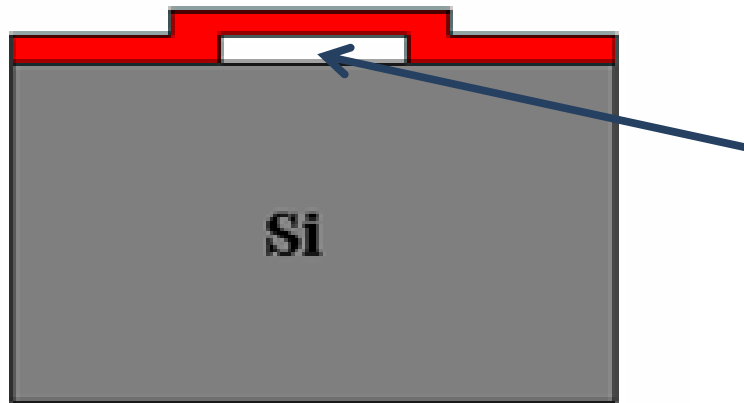
*Hátránya:*

- nemlineáris karakterisztika

# Két alapvető technológia

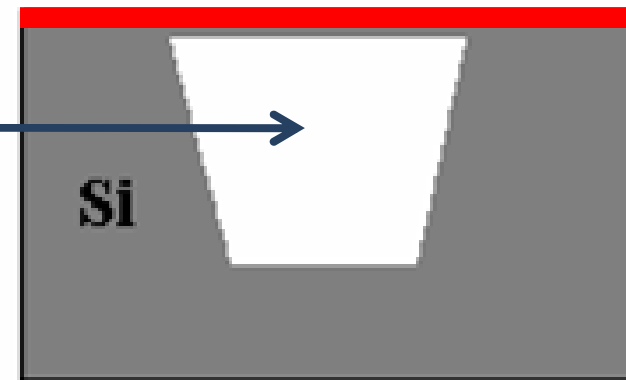
## Felületi mikromechanika (surface micromachining)

- leválasztott vékonyrétegekből
- Membrán: amorf v. polikristályos
- mechanikai tulajdonságok: -
- $a < 2-3 \mu\text{m}$
- termikus szigetelés: -



## Tömbi mikromechanika (bulk micromachining)

- az egykristály hordozóból
- Membrán: egykristály v. leválasztott
- mechanikai tulajdonságok: +
- $2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$
- termikus szigetelés: +



# GYORSULÁSÉRZÉKELŐ

## *Az érzékelés elve*

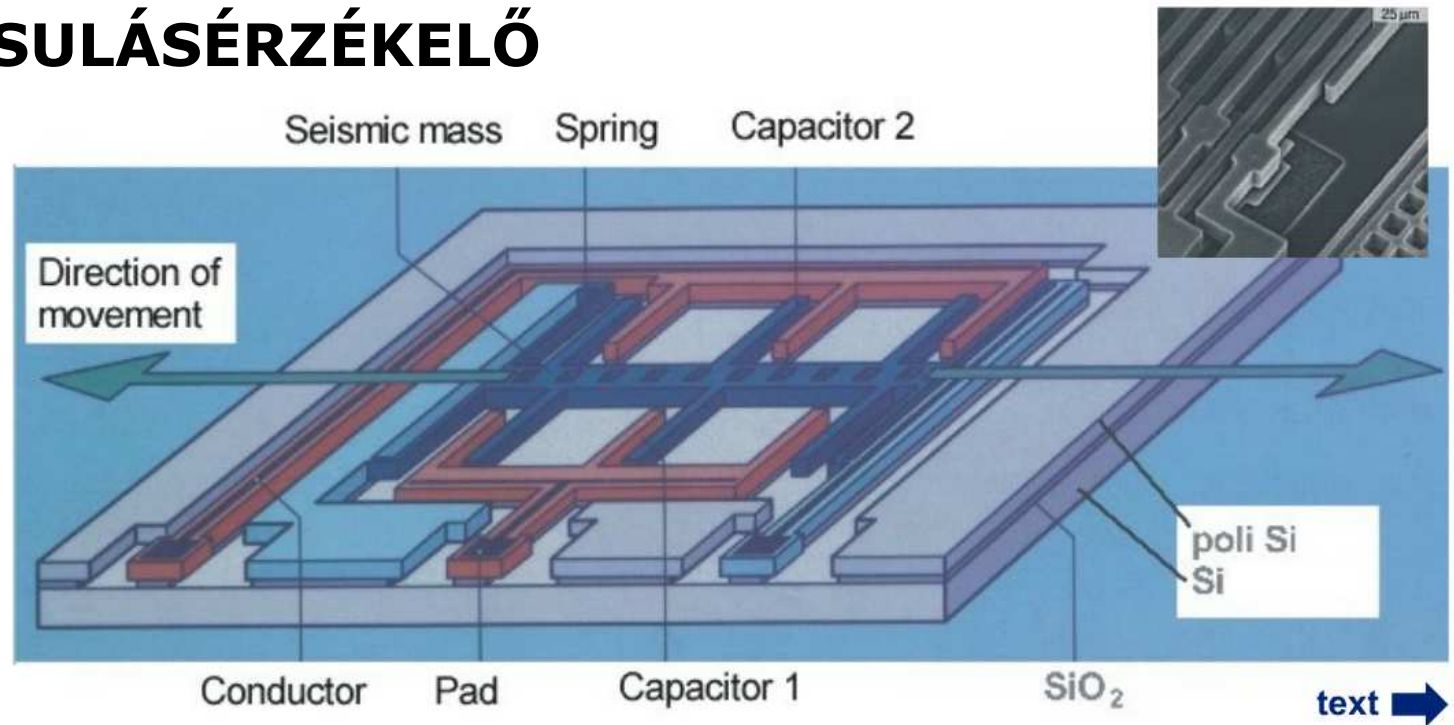
A gyorsulásérzékelő egy rugó és egy elmozduló (szeizmikus vagy inerciális tömeg) által alkotott rendszer. Ha a gyorsulás állandó, a szeizmikus tömeg elmozdul, míg a rugóerő ki nem egyenlíti a tehetetlenségi erőt.

Mikromechanikai és mikroelektronikai kivitelben a gyorsulásmérők kizárólag rugalmas lemezre (membrán) erősített szeizmikus tömegből állnak. Mind a rugalmas membrán mind a szeizmikus tömeg szilíciumból (Si) kialakítható.

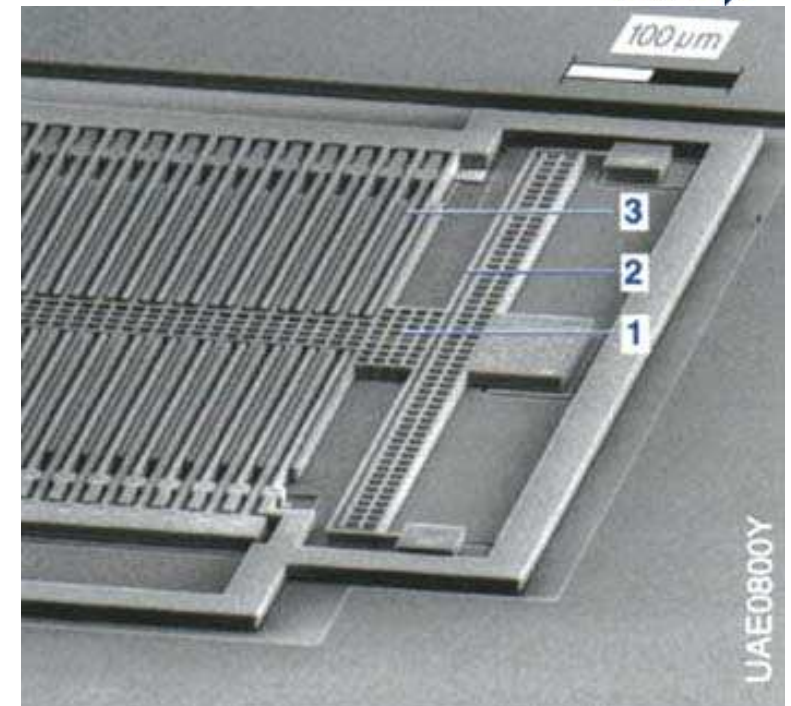
A gyorsulás okozta elmozdulás érzékelésére szolgáló három általános módszer:

1. kapacitás mérés elmozduló és álló elektródák között.
2. a rugóban ébredő feszültségek/deformációk mérése piezorezisztív módszerrel;
3. a rugóban ébredő mechanikai feszültség által a piezoelektromos hatás révén létrehozott töltés vagy elektromos feszültség mérése.

# KAPACITÍV GYORSULÁSÉRZÉKEŐ



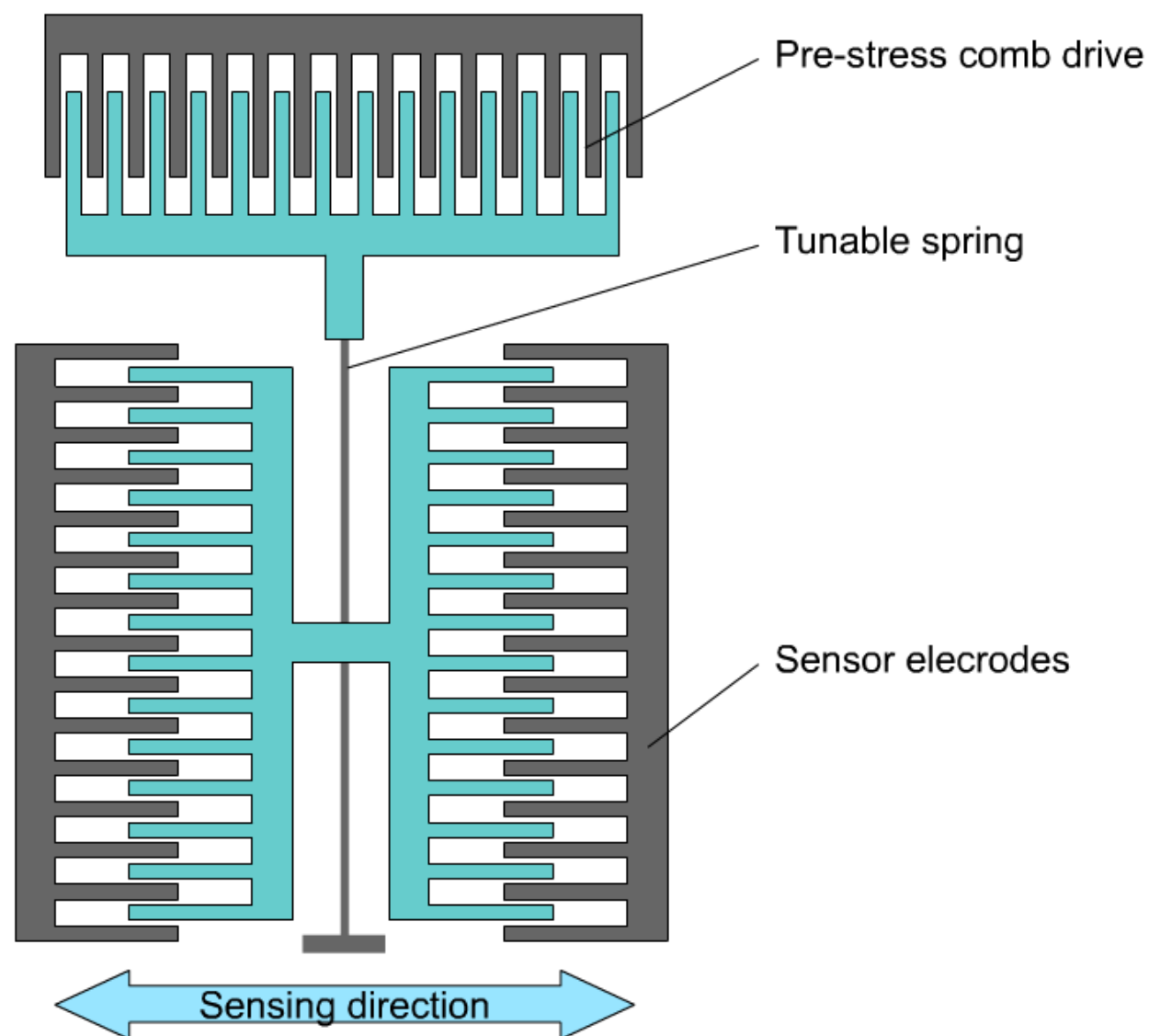
1. Rugóztatottan felfüggesztett szeizmikus tömeg az elektródákkal
2. Rugó
3. Rögzített elektródák





# REZGÉSÉRZÉKEŐ

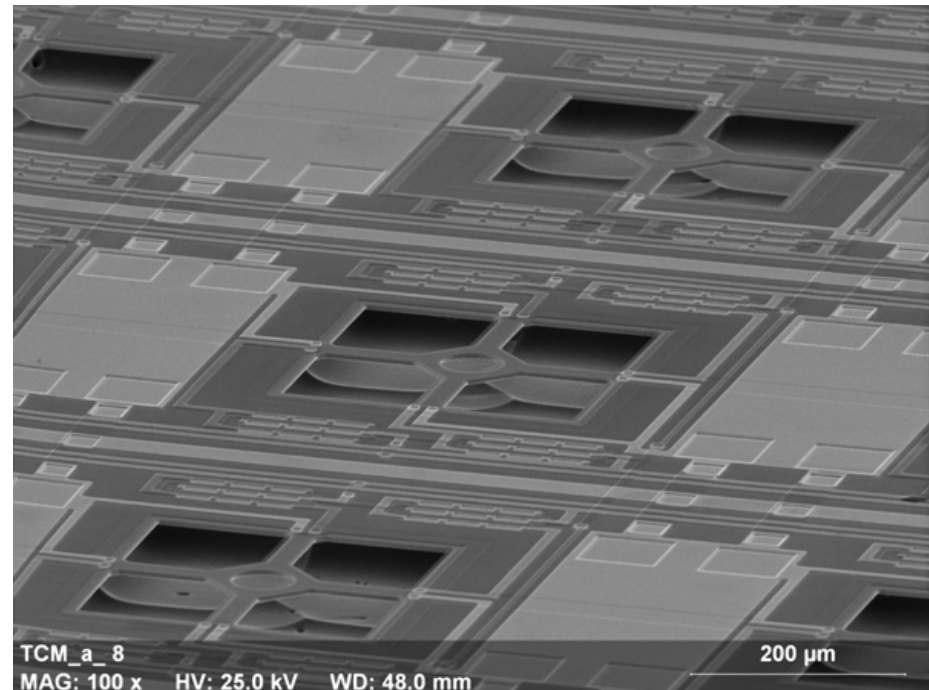
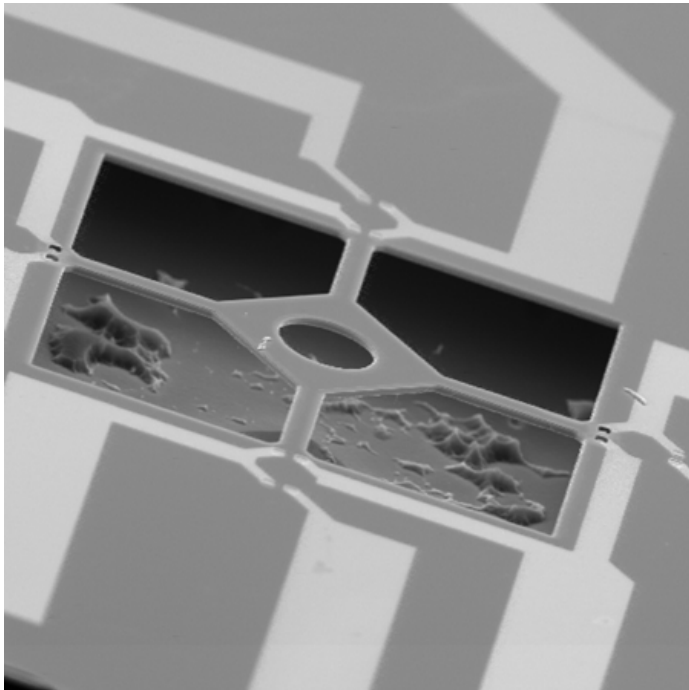
In surface micromachined Si vibration sensors movable structures are etched out using sacrificial layers. The moving part is suspended by a pre-stressed spring, so that the spring constant is tunable and can change device sensitivity. The fingers to both sides as well as fingers attached to the wafer surface form a capacitance for signal pickup. This capacitance is changing during vibration.



# 3D MIKROERŐMÉRŐ

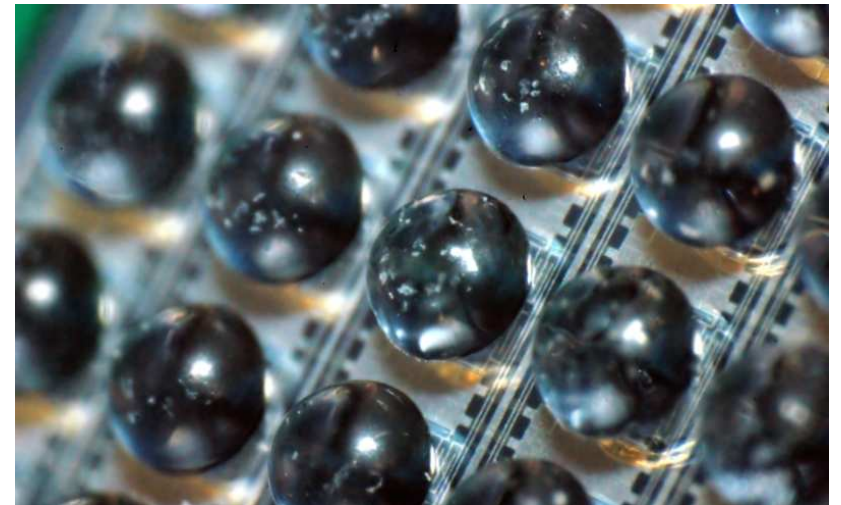
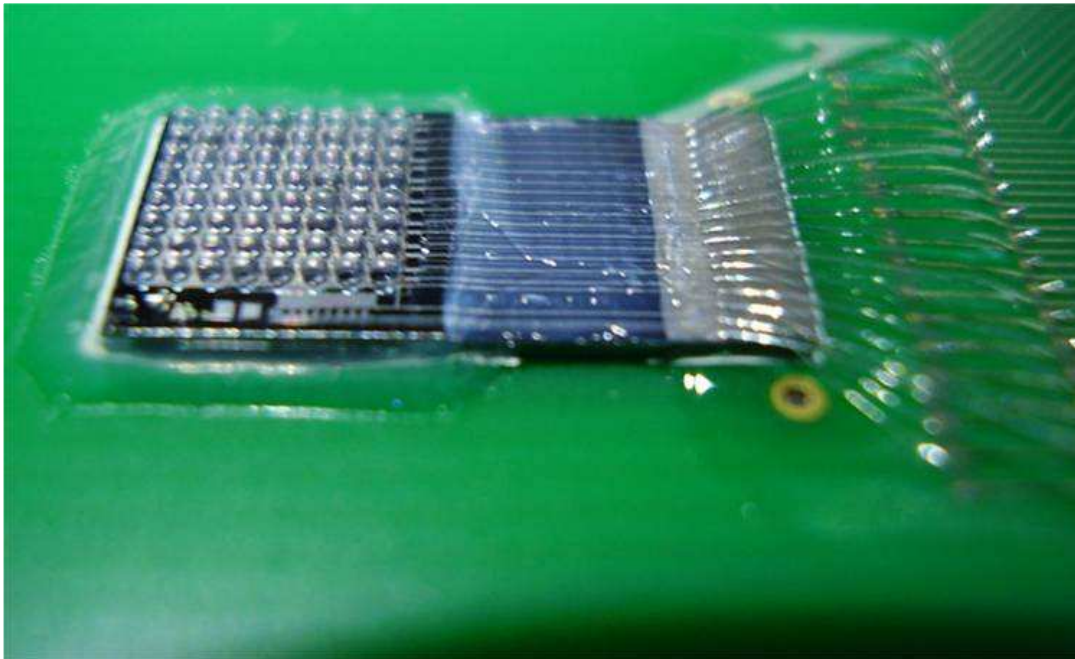
## Az erőmérő struktúra felépítése

- perforált egykristályos szilícium membrán a kiemelkedő érzékenység miatt
- pórusos Si segédréteg technológiával kialakított felfüggesztett struktúra
- a kristály deformációjára érzékeny p+ piezoellenállások az n-típusú Si-ban
- 300 $\mu$ m befoglaló méret: érzékelő hálózat az emberi receptoroknak megfelelő felbontásban
- integrált kapu-tranzisztorok

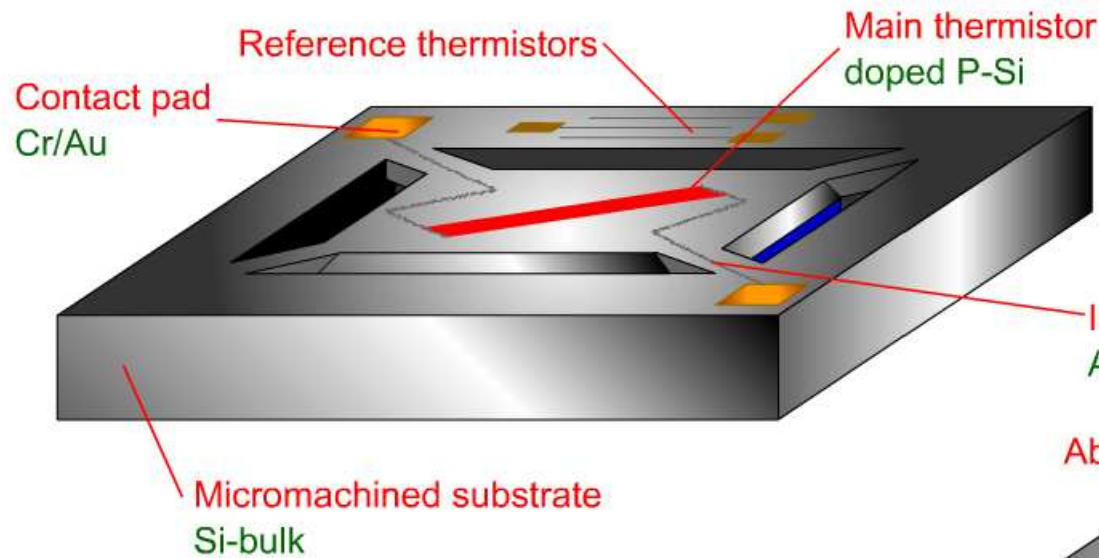


## Jellemzők

- Egyoldalas Si mikromechanikai megmunkálás, piezorezisztív érzékelés
- A felületi erők és a mért feszültségek között egyszerű lineáris összefüggés
- A három erőkomponens egymástól függetlenül mérhető



# TERMIKUS SUGÁRZÁSÉRZÉKEŐ

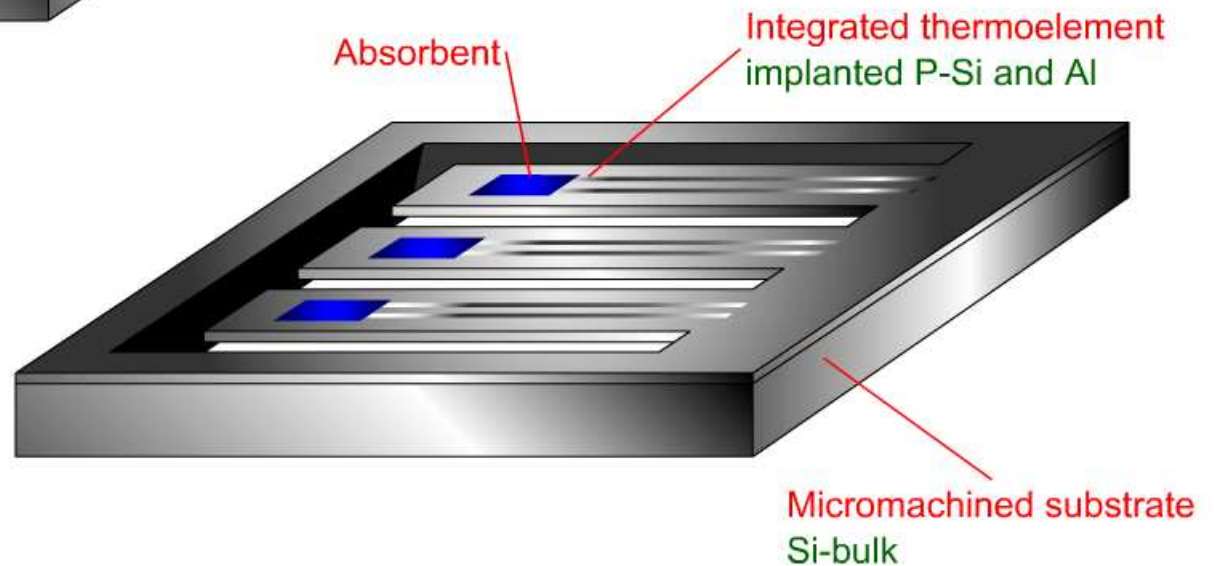


The bolometer (left) measures the temperature difference caused in the absorbent by radiation. It uses thermistor for it.

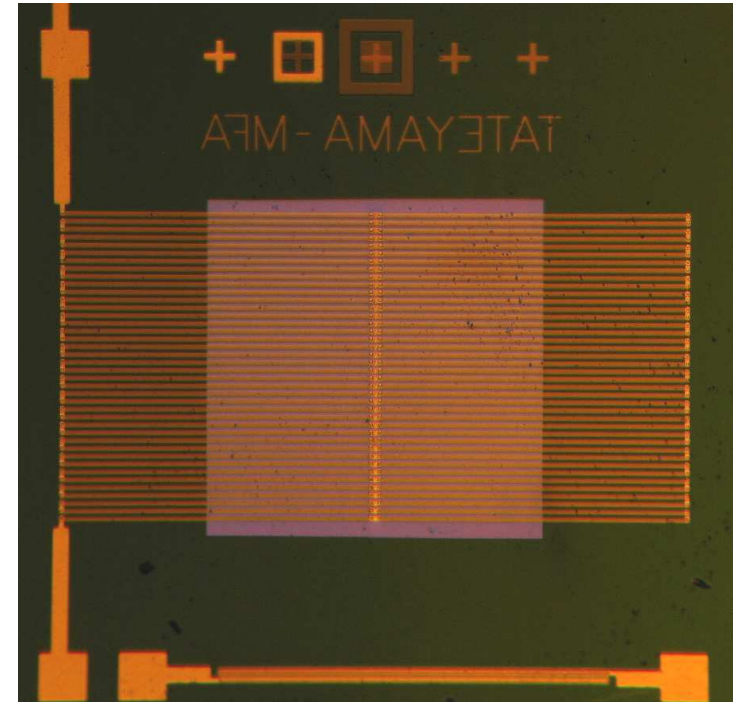
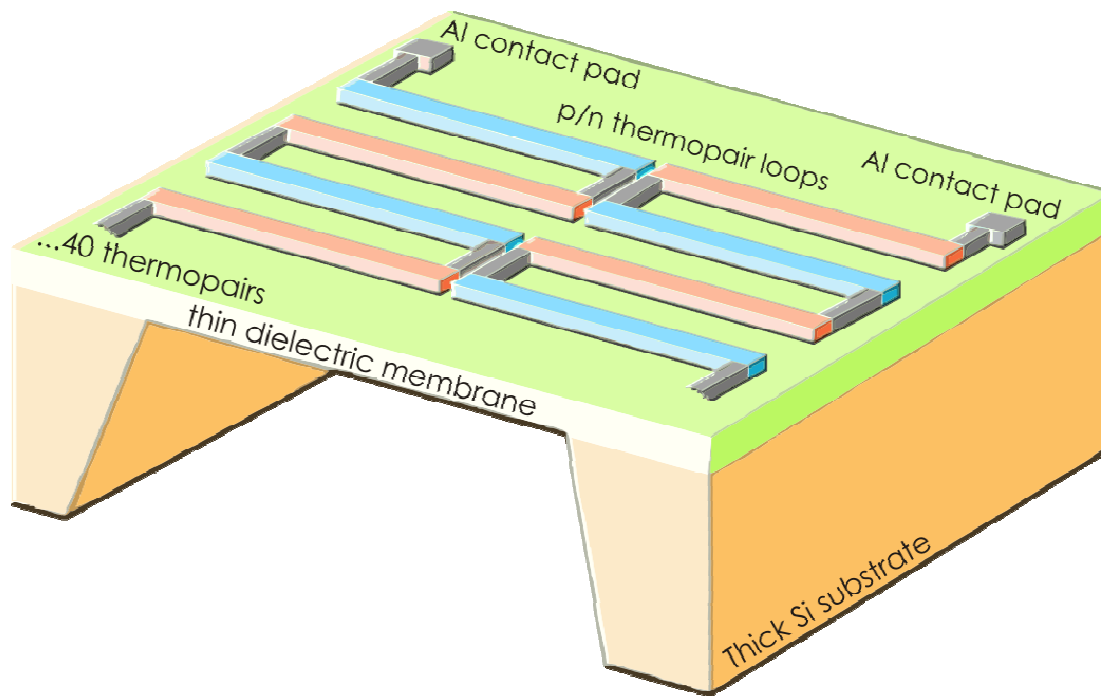


Measuring process

The thermopile (right) measures the temperature different with thermoelements in serial connection.

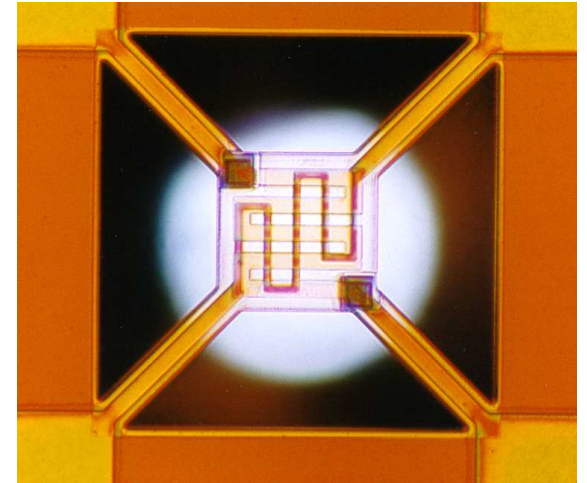
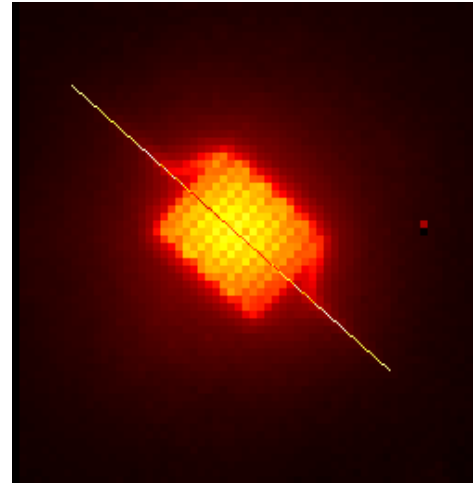
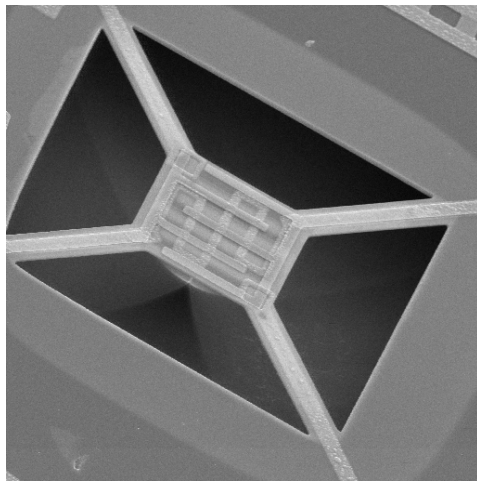
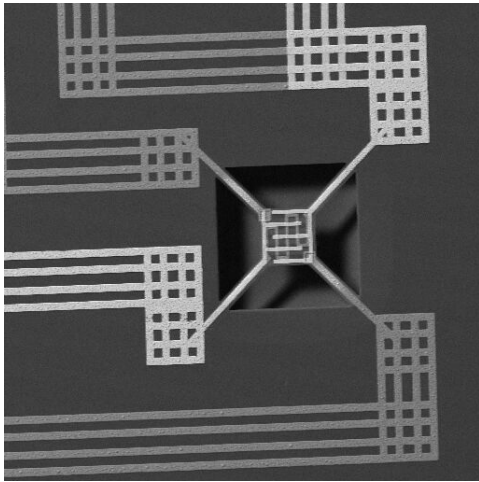


# TERMIKUS SUGÁRZÁSÉRZÉKEŐ





# FÉM-OXID FÉLVEZETŐ (TAGUCHI) GÁZÉRZÉKELŐK



## SiNx membrán

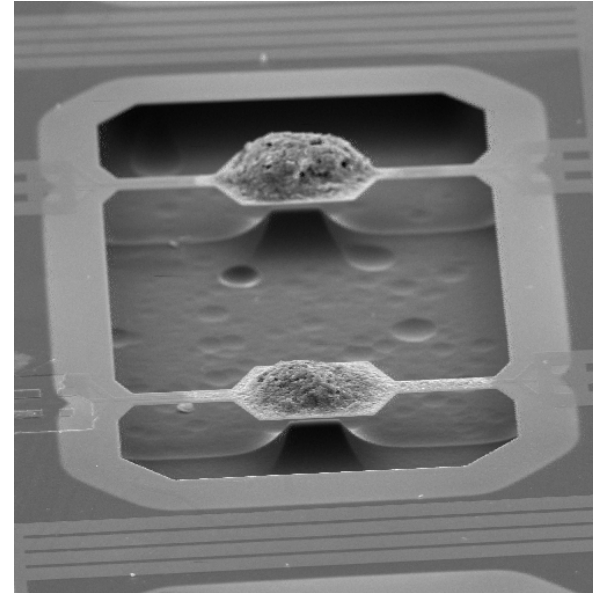
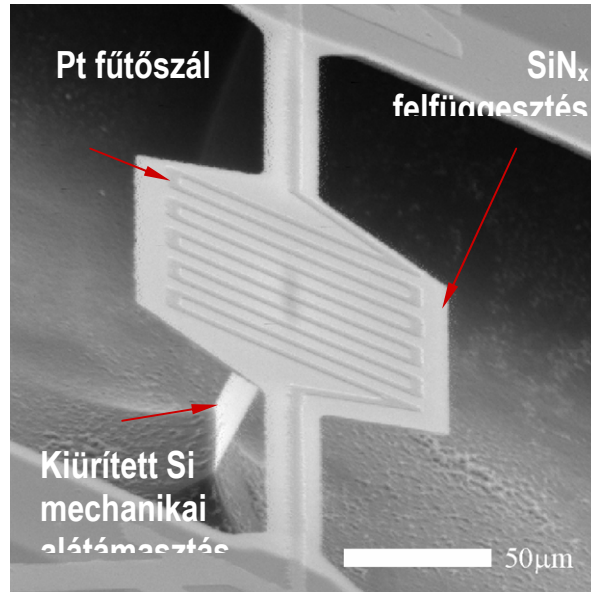
- interdigitalis elektródok a vezetőképességméréshez
- fém-oxid érzékelő réteg, adalékolt  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$
- 100-400 °C a mikro-fűtőtest segítségével

Redukáló gáz hatására megnő a vezetőképesség.



# PELLISZTOR (MIKROREZSÓ) TÍPUSÚ GÁZÉRZÉKELŐ ÉGHETŐ GÁZOK MÉRÉSÉRE

Pellisztor: éghető gázok katalizált oxidációja során felszabaduló hő mérése



## *Felépítés:*

Si lemez lebeg, 2x2 áramvezeték, fűtőtest, hőmérő. Erre épül a gázt elégető katalizátor.

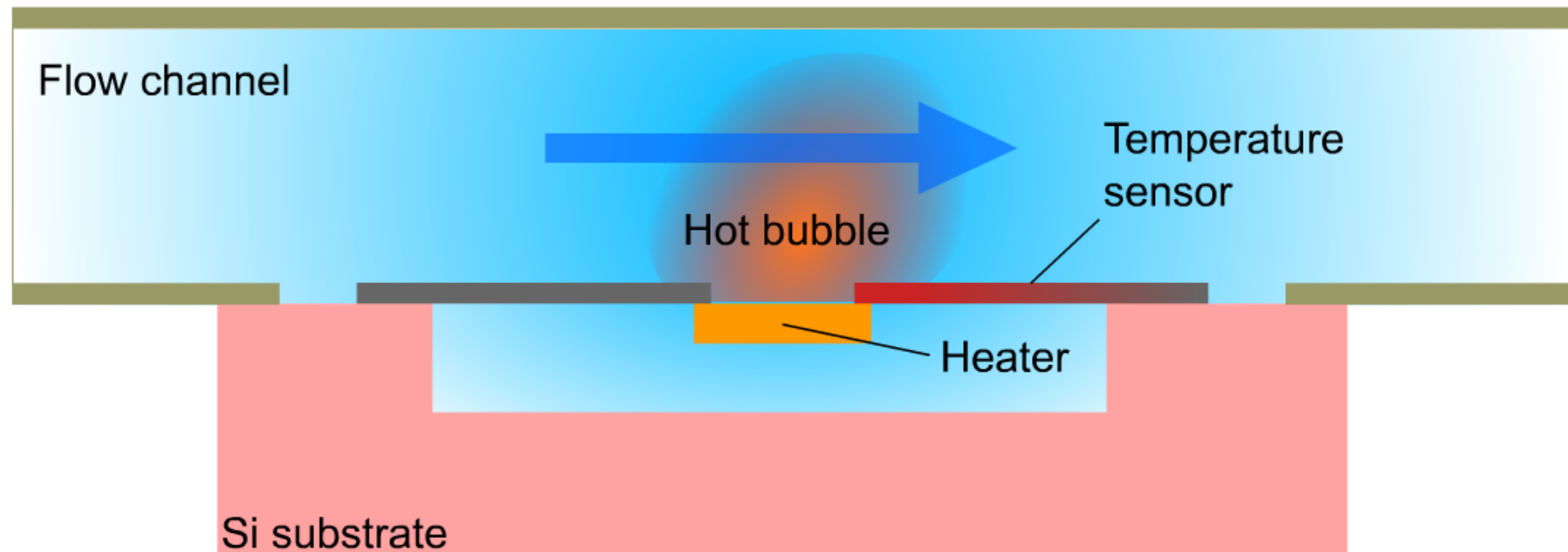
Termikusan szigetelt platina mikro-fűtőtest

Kis teljesítményfelvétel

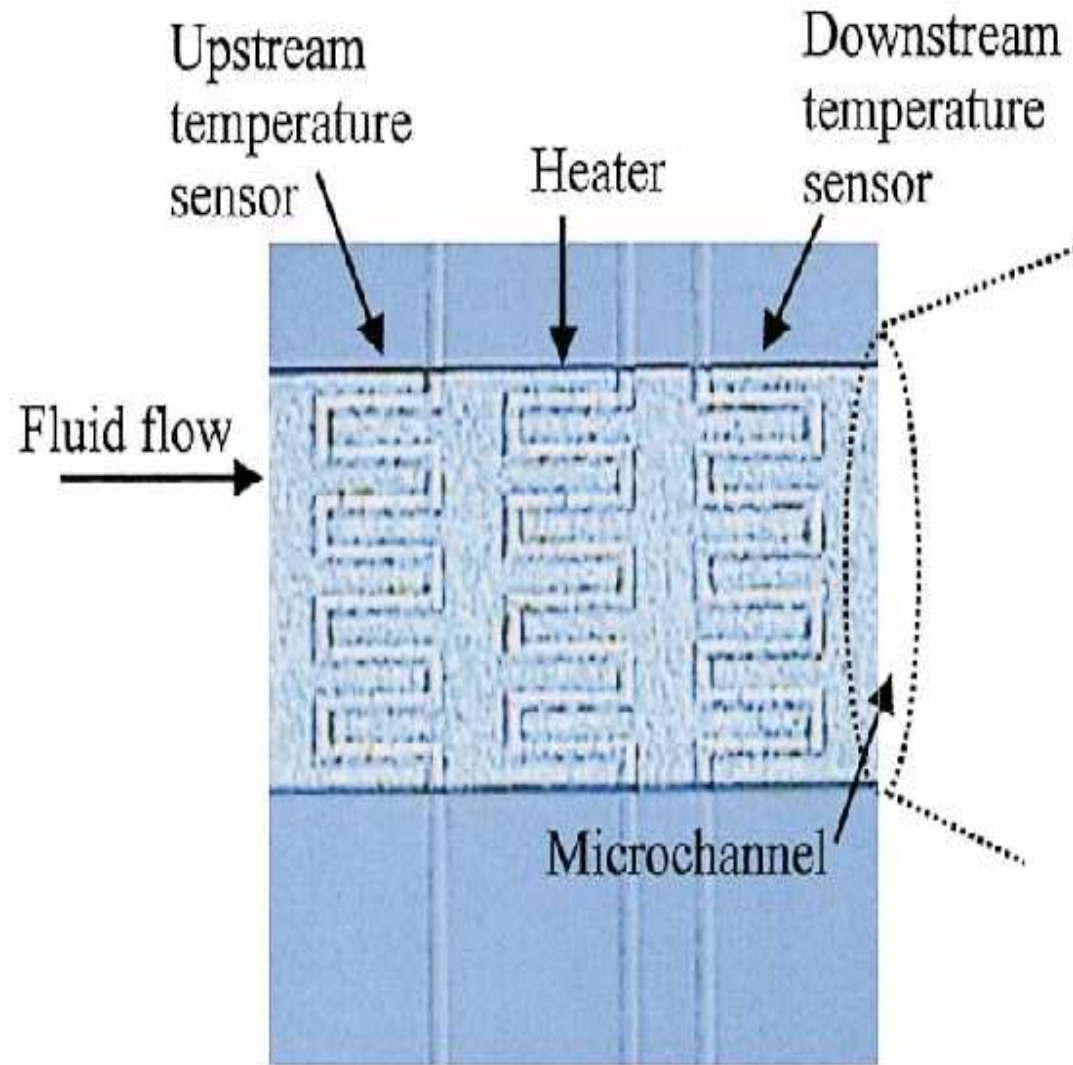
Éghető gázok robbanásbiztos detektálása

# (GÁZ)ÁRAMLÁSÉRZÉKELŐ

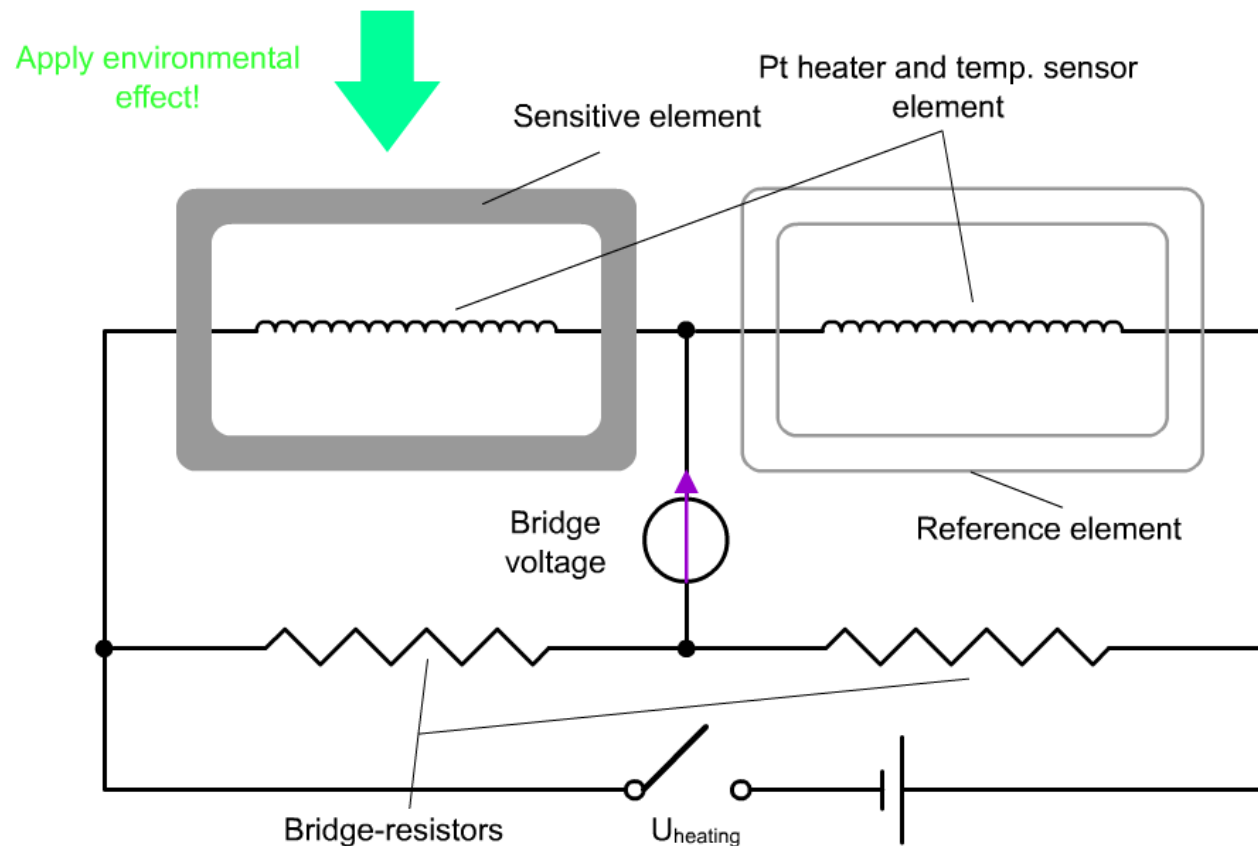
In the **aerodynamic flow sensor** a hot air bubble is generated by a heater filament. The flow-rate of a fluid (or gas) can be sensed through the deformation of the air bubble. There are temperature sensors on both sides of the heater filament for signal pickup. The temperature is changing proportional to the flow-rate.



# KALORIMETRIKUS (PELLISZTOROS) ÁRAMLÁSMÉRÉS A GYAKORLATBAN



# KALORIMETRIKUS (PELLISZTOROS) ÁRAMLÁSMÉRÉS KÉT FŰTŐELEMMEL

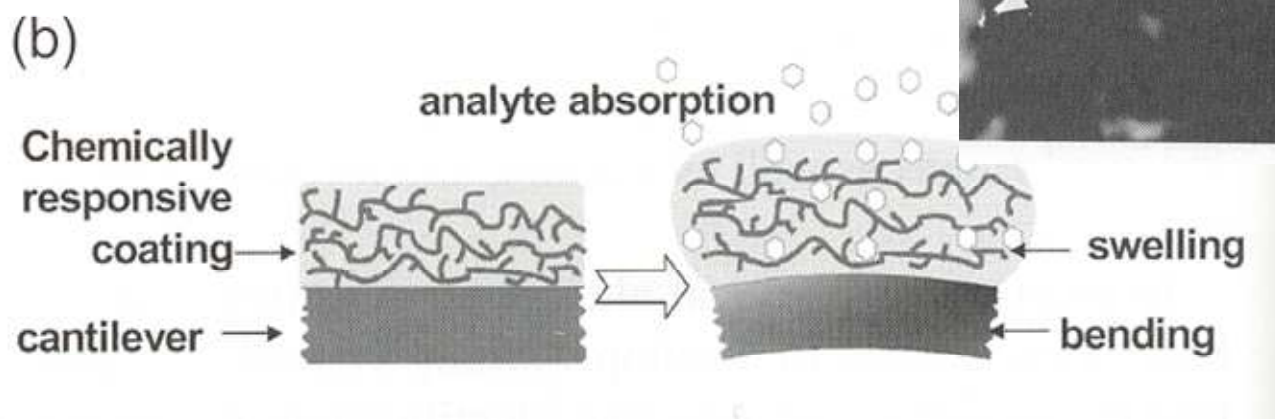
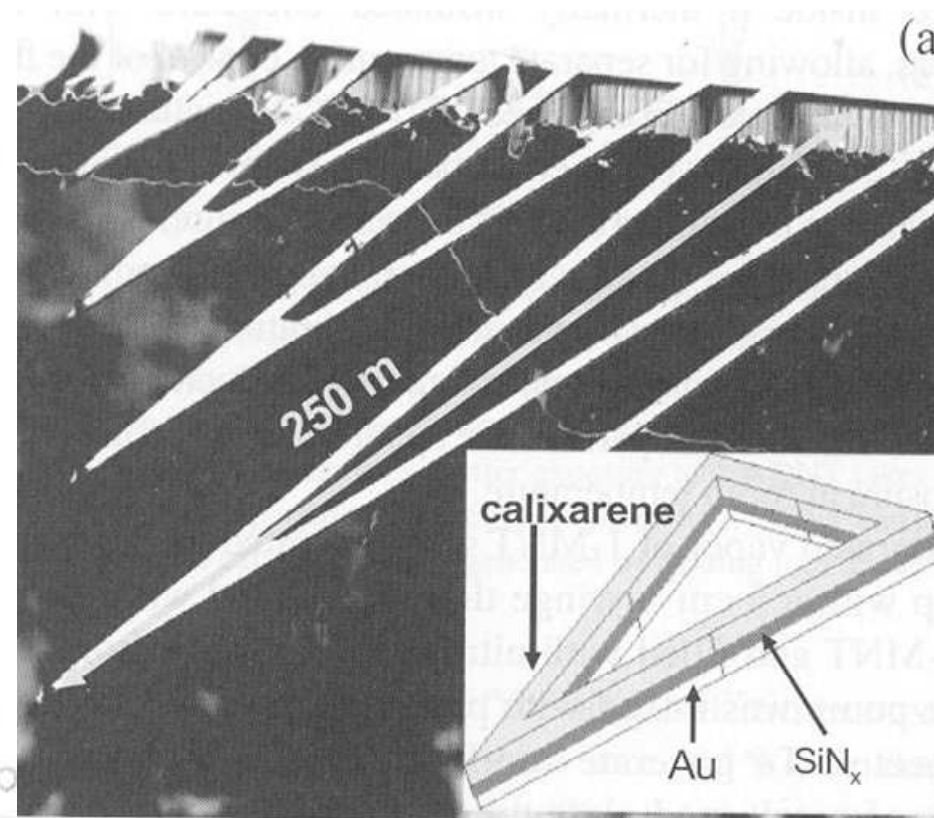
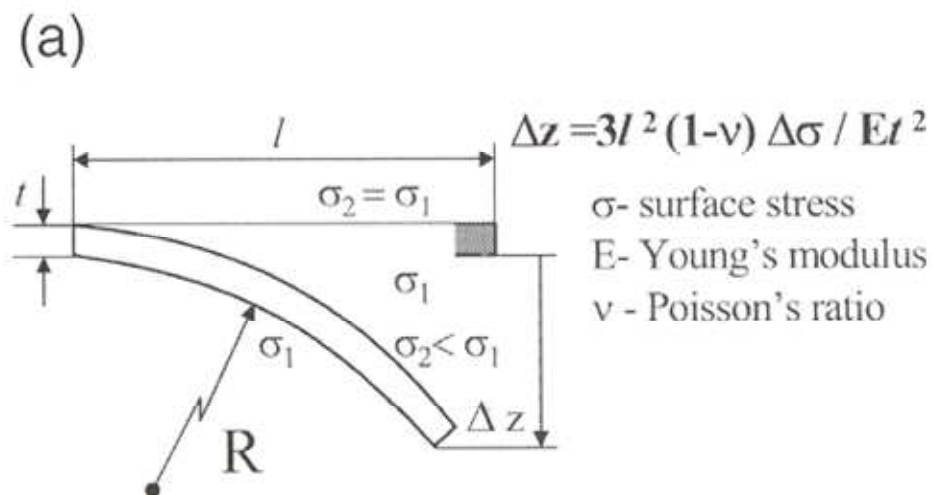


Működési módok:

Adiabatikus: A két fűtőtéljesítmény megegyezik, a hőmérsékletkülönbséget detektálják.

Izotermikus: az érzékelő elem fűtőtéljesítményét addig változtatják, amíg a hőmérséklete meg nem egyezik a referenciaelemével. A fűtőtéljesítmény változását detektálják.

# Mesterséges szaglás molekulaszintű érzékenységgel



Kémiai érzékelés: **korlátozott szelektivitás**  $\longrightarrow$  processzálas

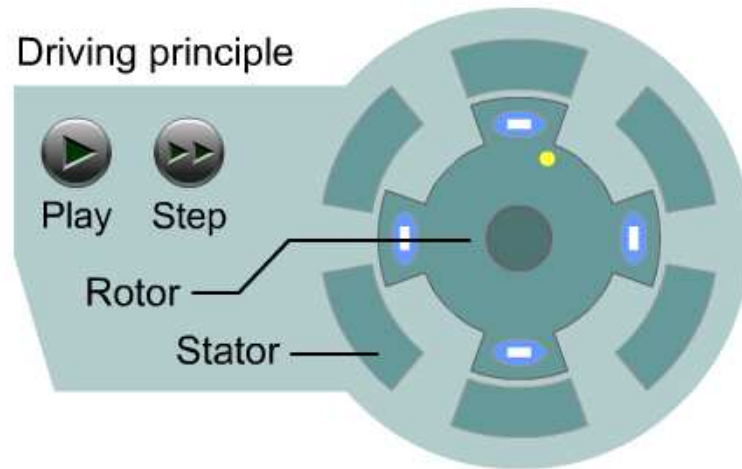


# SZILÍCIUM MIKROMOTOR

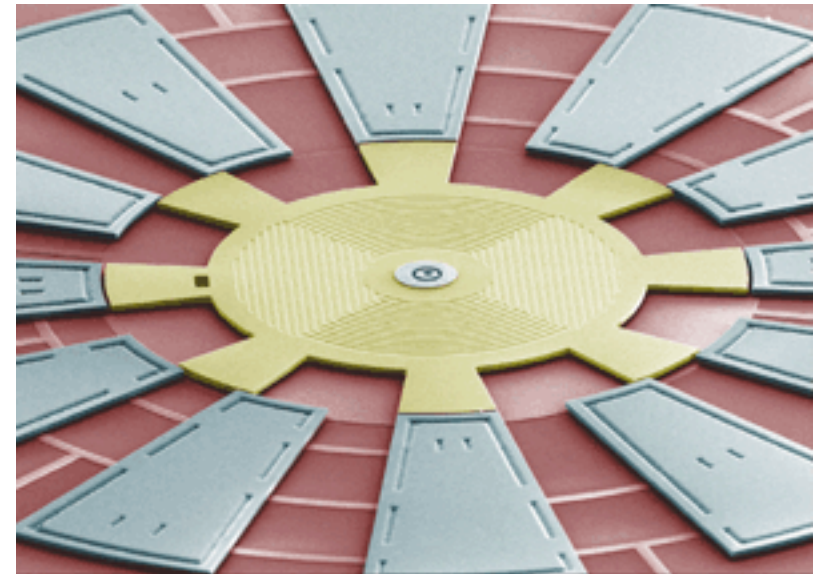
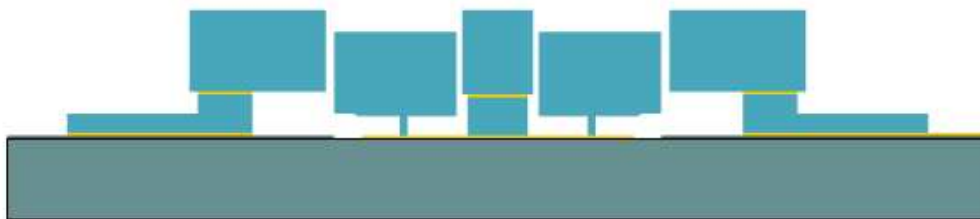
## Silicon micromotors

[Related topics](#)

Both the stator and rotor parts of the micro-motors are fabricated by MEMS technology. The rotor turns due to electrostatic field generated by the alternating voltage difference between the electrodes.

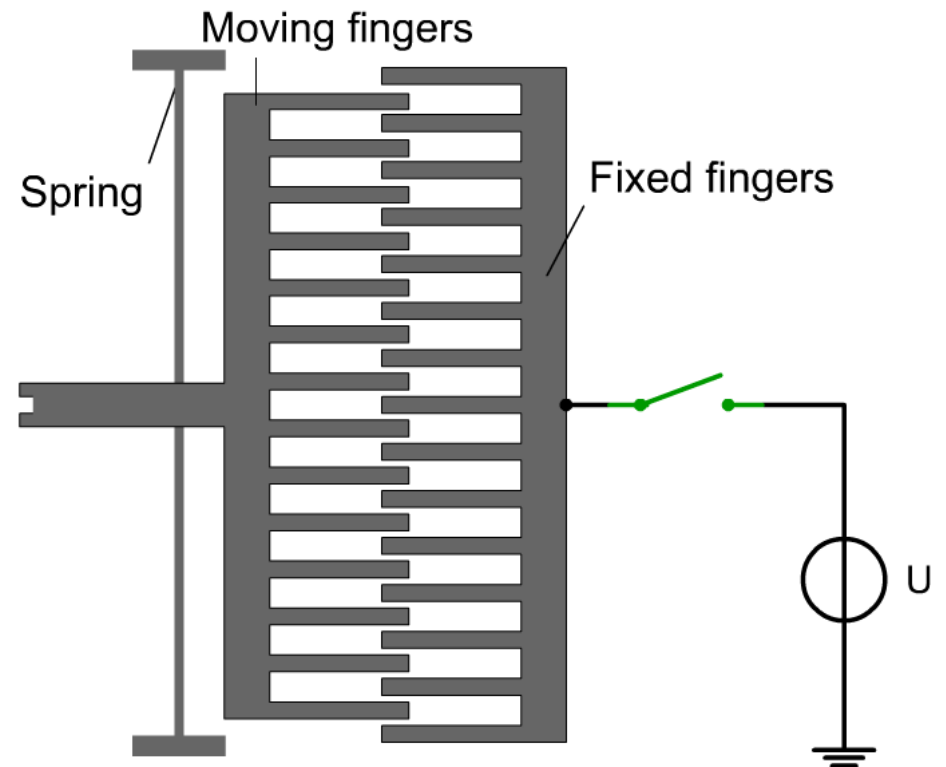
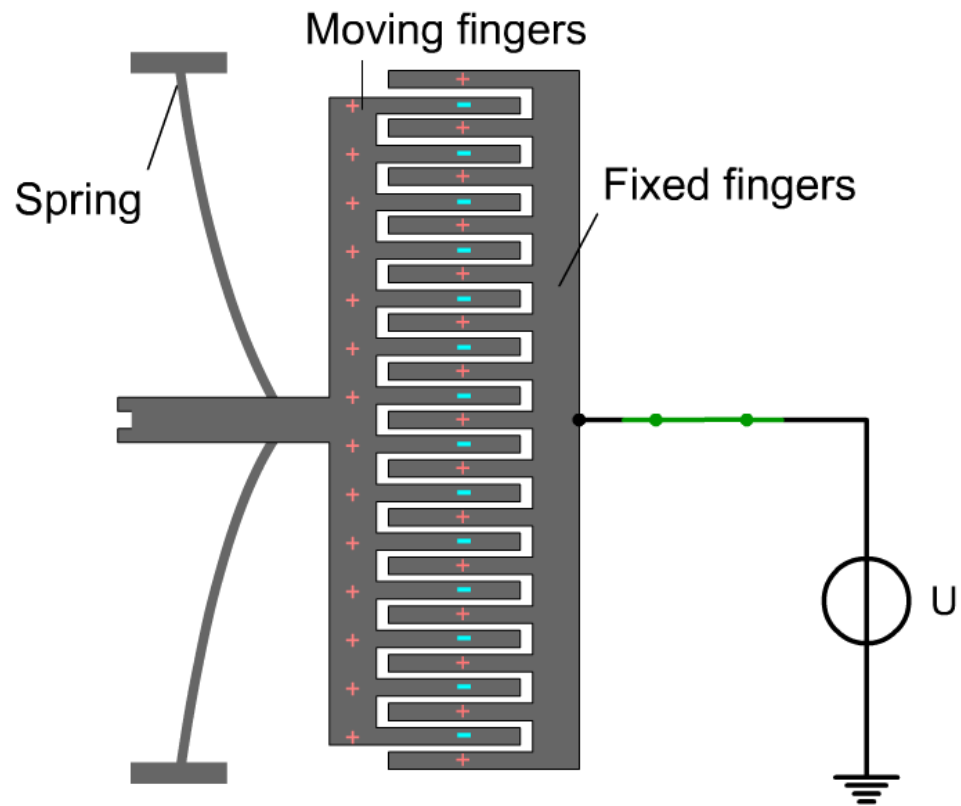


Cross-section of the micromotor

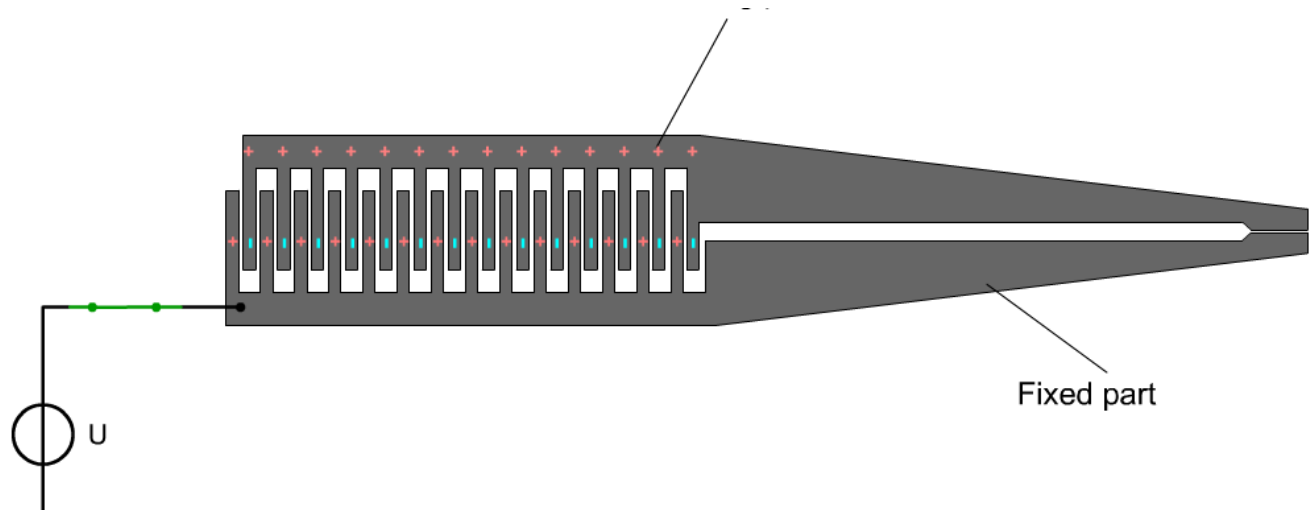
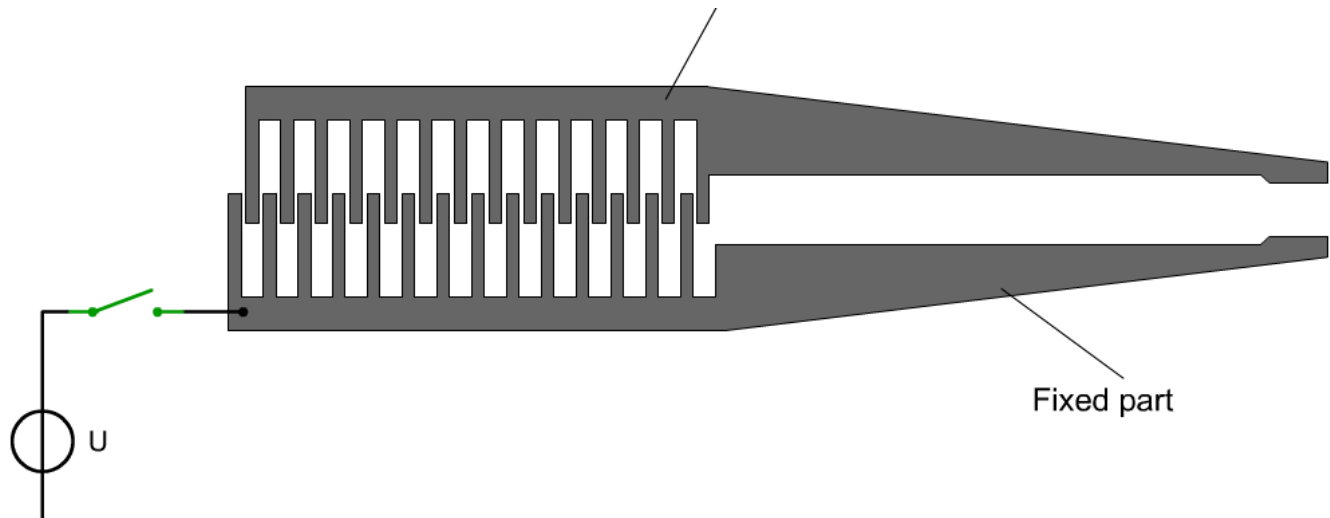




# FÉSŰS POZICIONÁLÓ



# MIKROCSIPESZ



# MIKROFLUIDIKA

A mikrofluidika a folyadékok olyan precíz kezelése, amelyhez tipikusan milliméter alatti geometriai méretű csatornákat használnak.

Mikrofluidika a 80-as évek elején jelent meg a tintasugaras nyomtatófejek fejlesztésénél.

Példa: lab-on-chip technológia,

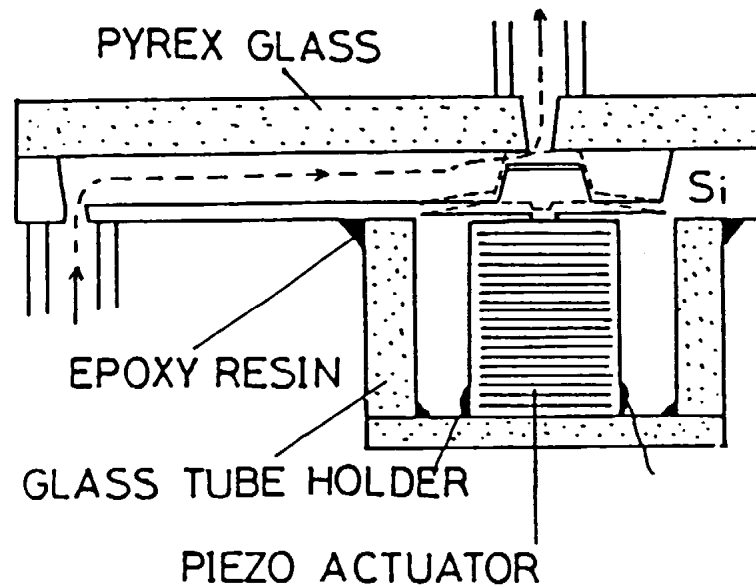
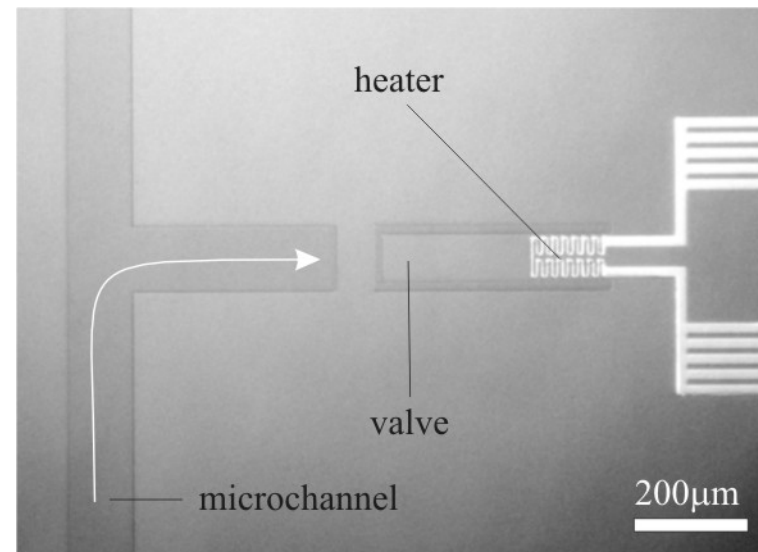
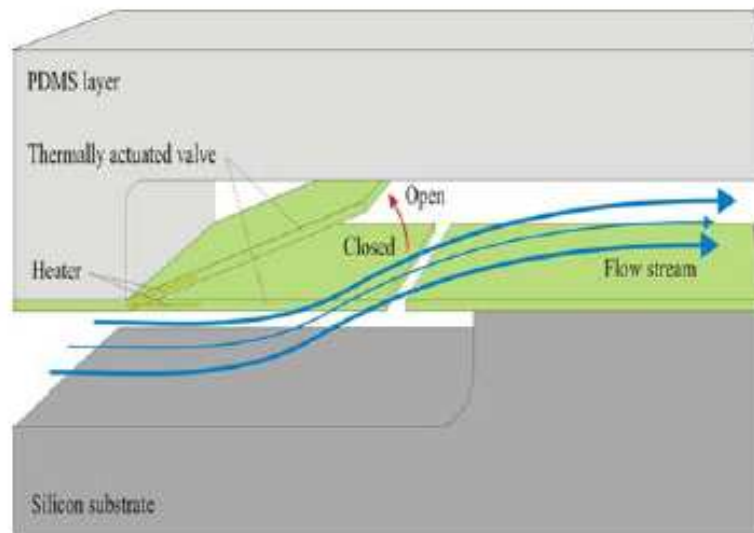
## **Motiváció:**

Mikroméretű analitikai rendszerek létrehozása (pl. orvosdiagnosztika, stb...)

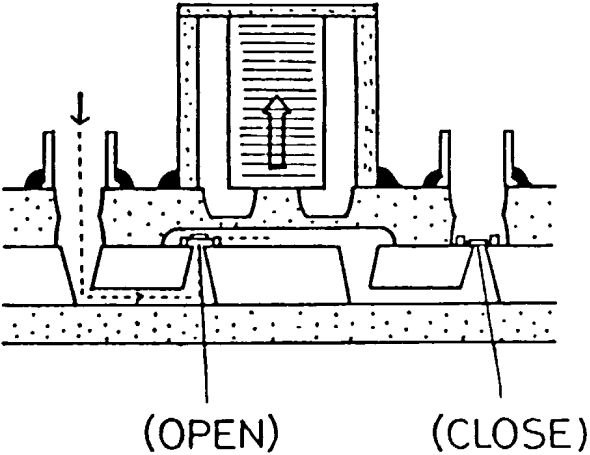
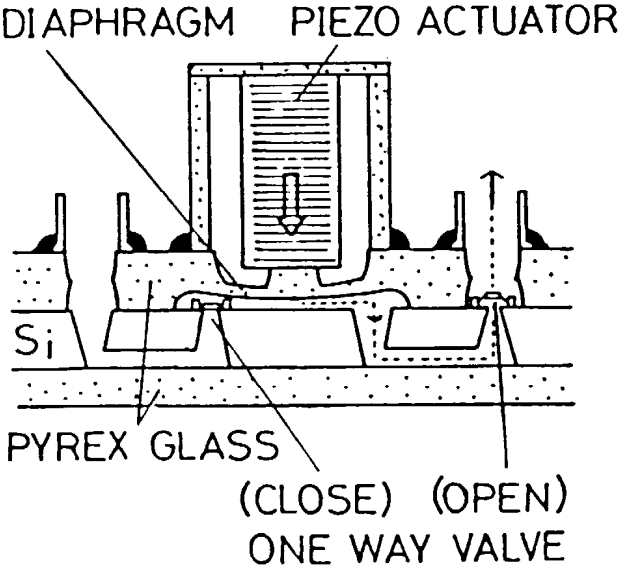
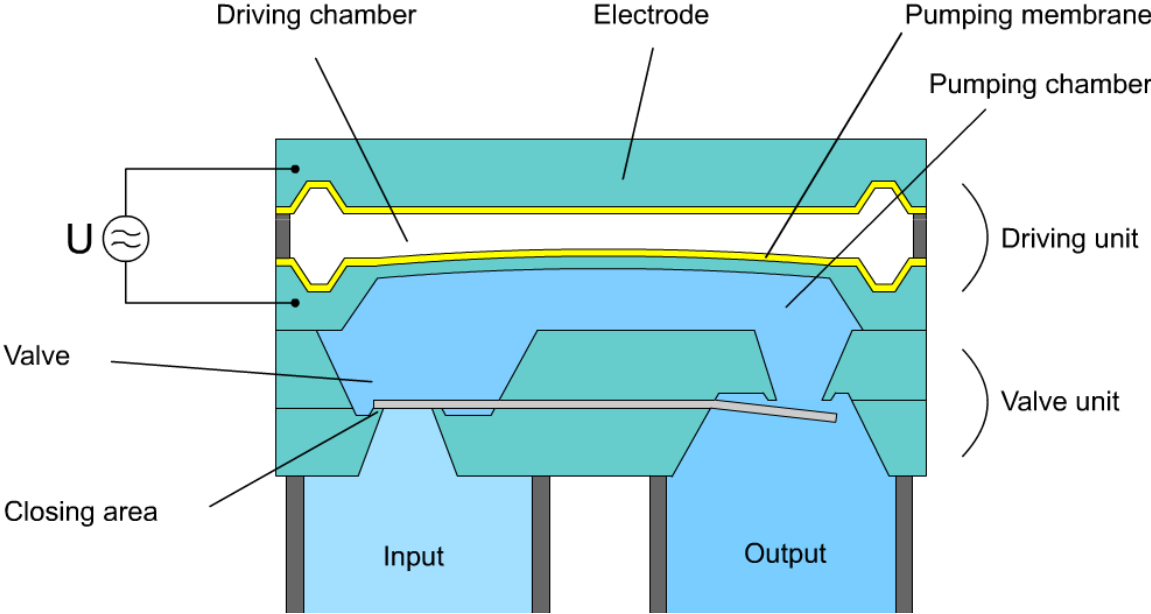
Mintakezelés, mérés mikroméreteken: (kis  $Re$ , lamináris áramlás !!!)

Előnyei: ml mintatérfogat, reakcióidő csökkenése, eldobható eszközök (olcsó).

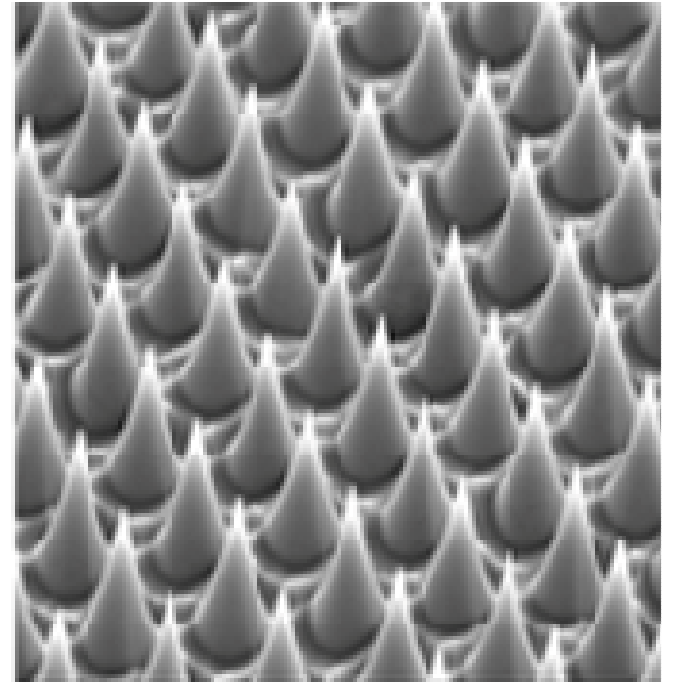
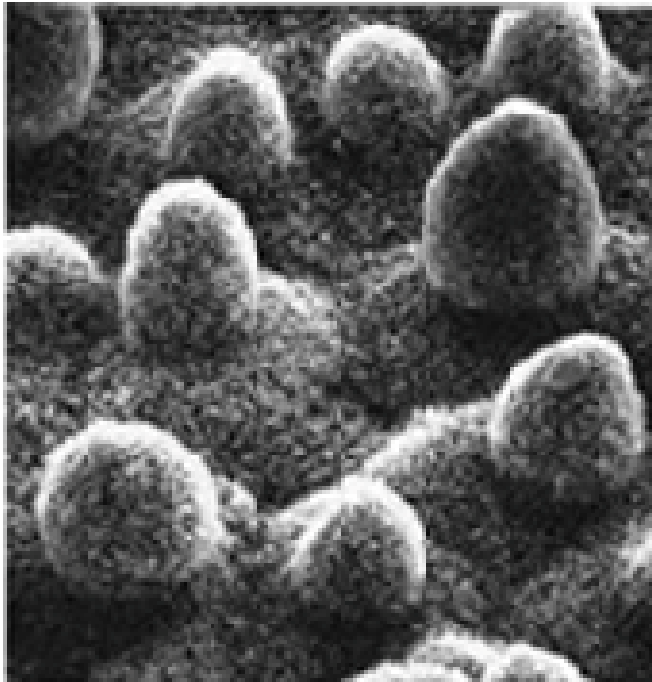
# MIKROFLUIDIKAI SZELEP



# MIKROSZIVATTYÚ



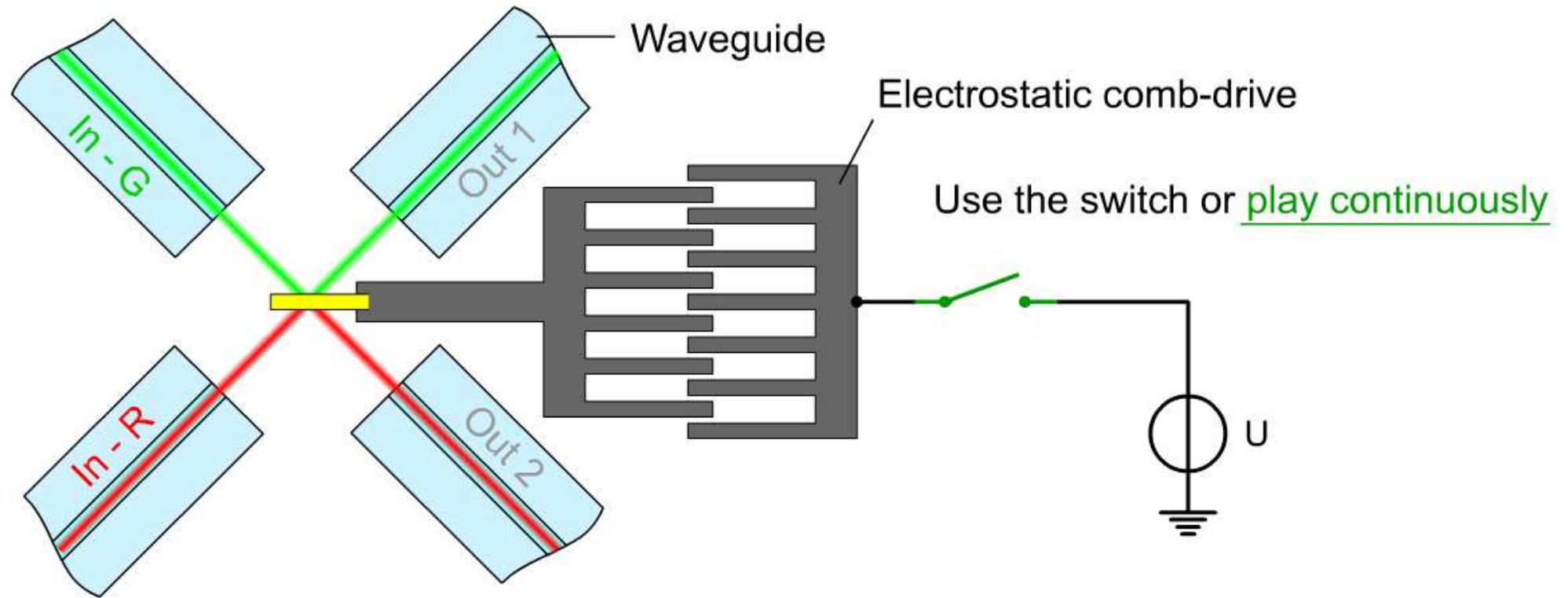
# BIOMIMETIKA – SZUPERHIDROFOBITÁS



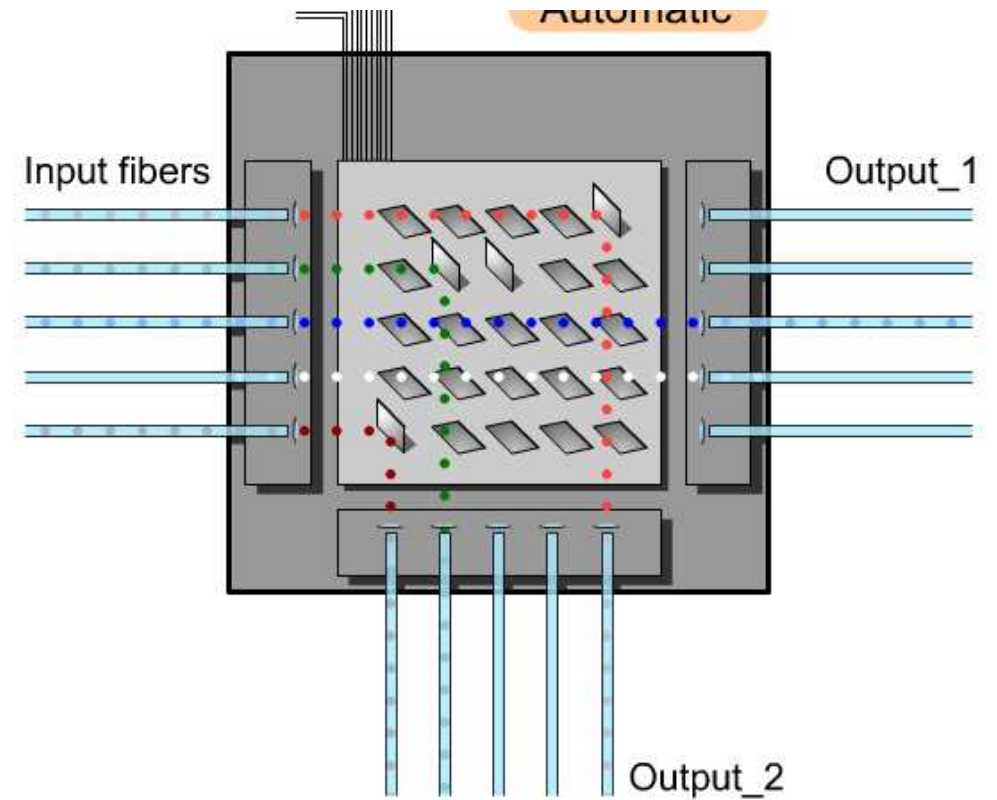
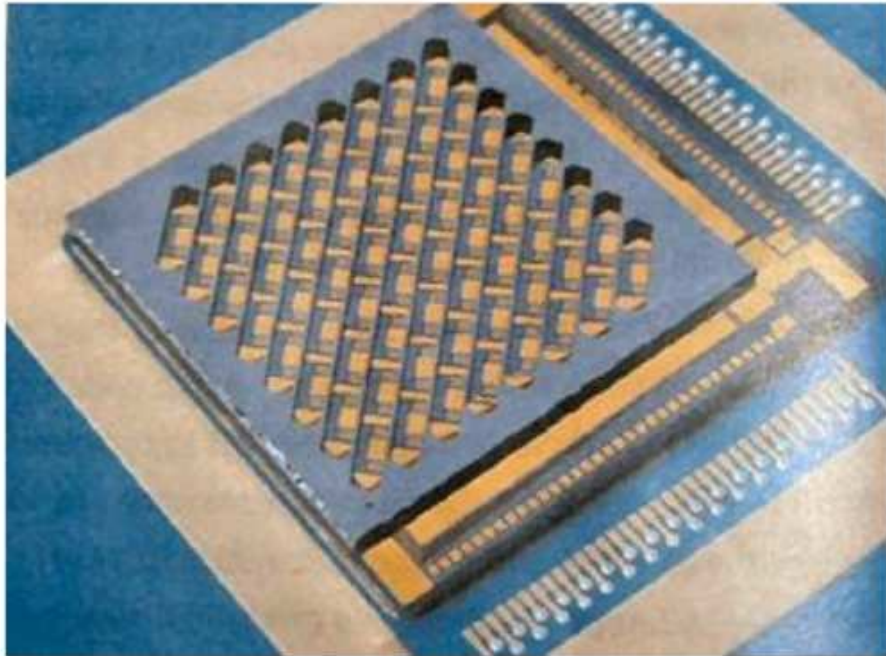
Cseppek 2D mozgatója, kihasználva a nedvesítési tulajdonságok feszültségfüggését.



# OPTIKAI MIKROKAPCSOLÓ (MICROSWITCH)

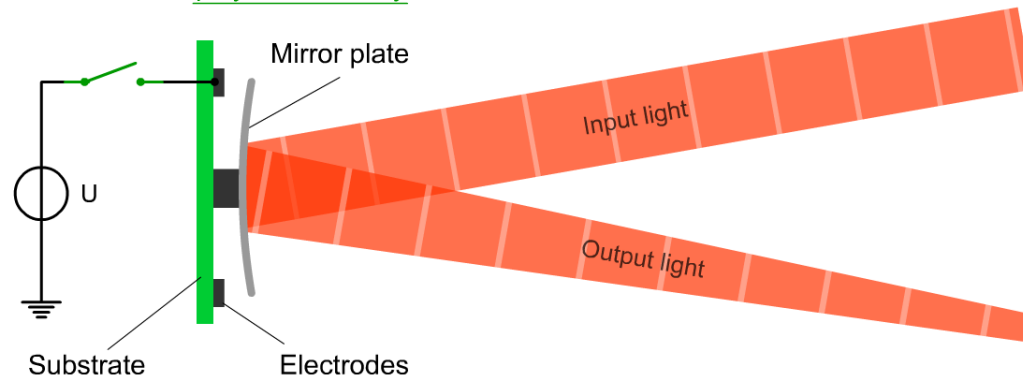


# MIKRO(SUGÁR-)KAPCSOLÓ

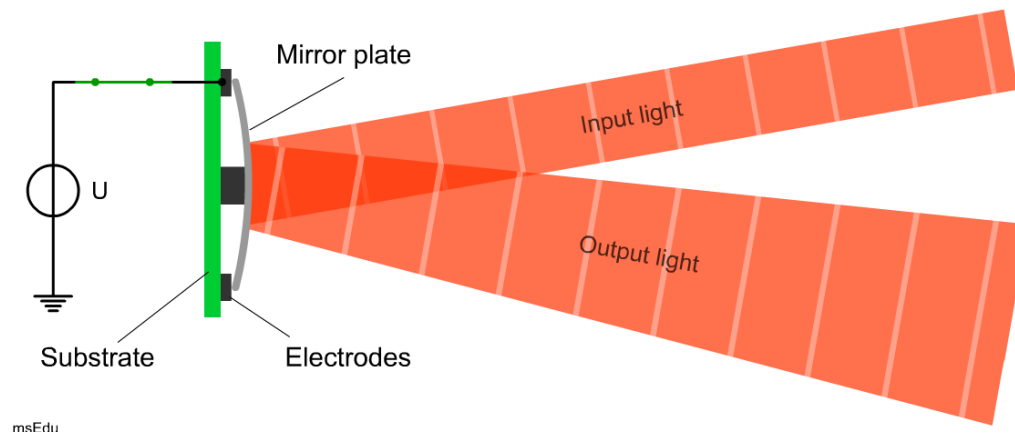


# DEFORMÁLHATÓ TÜKÖR

Use the switch or [play continuously](#)



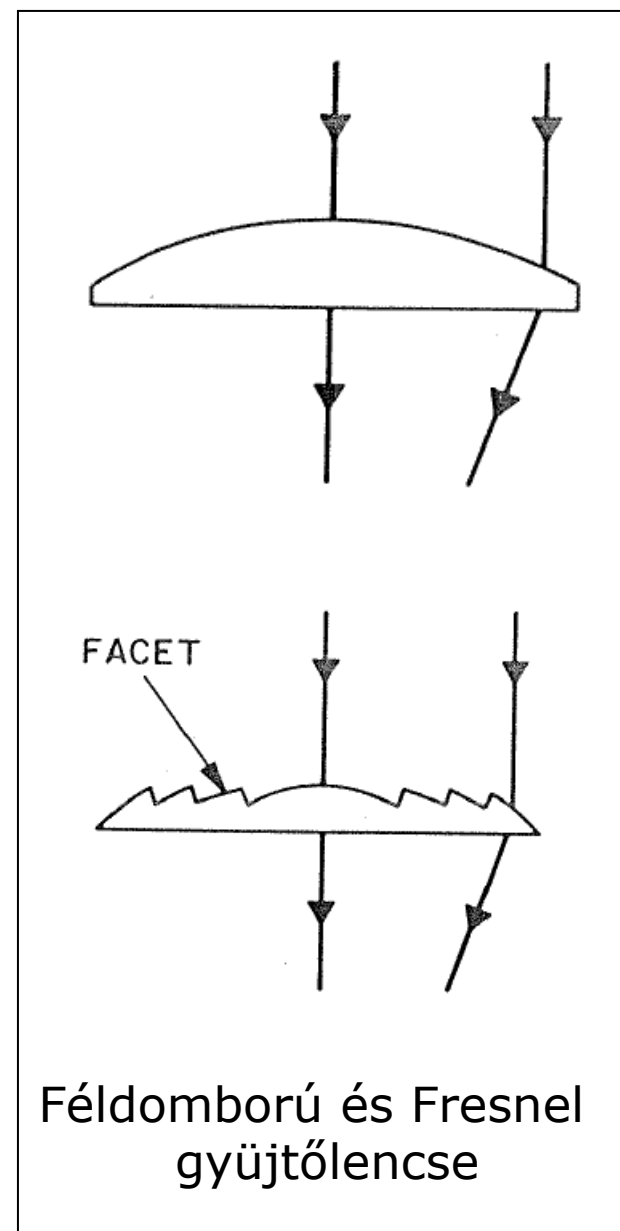
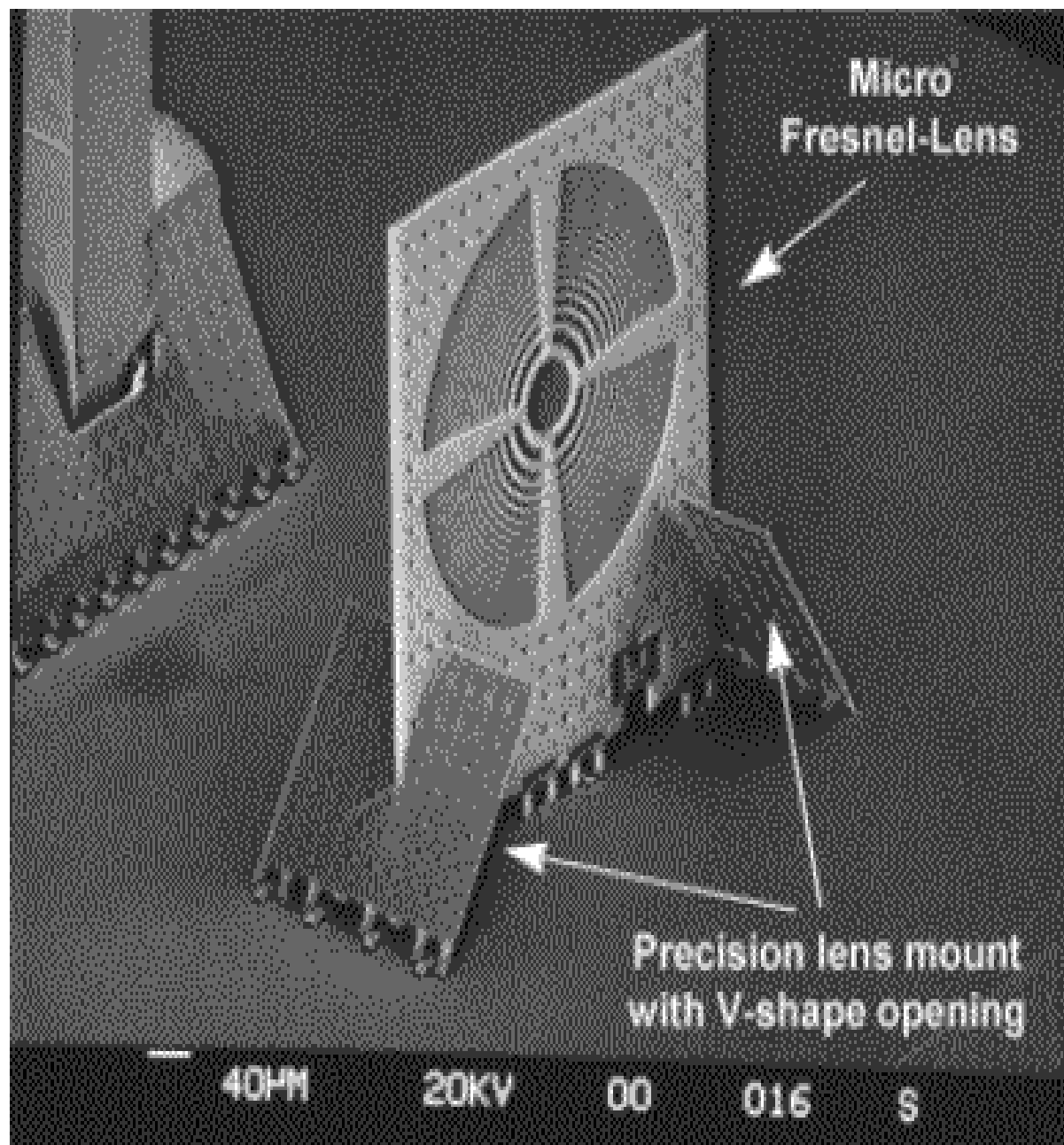
39



msFdu

40

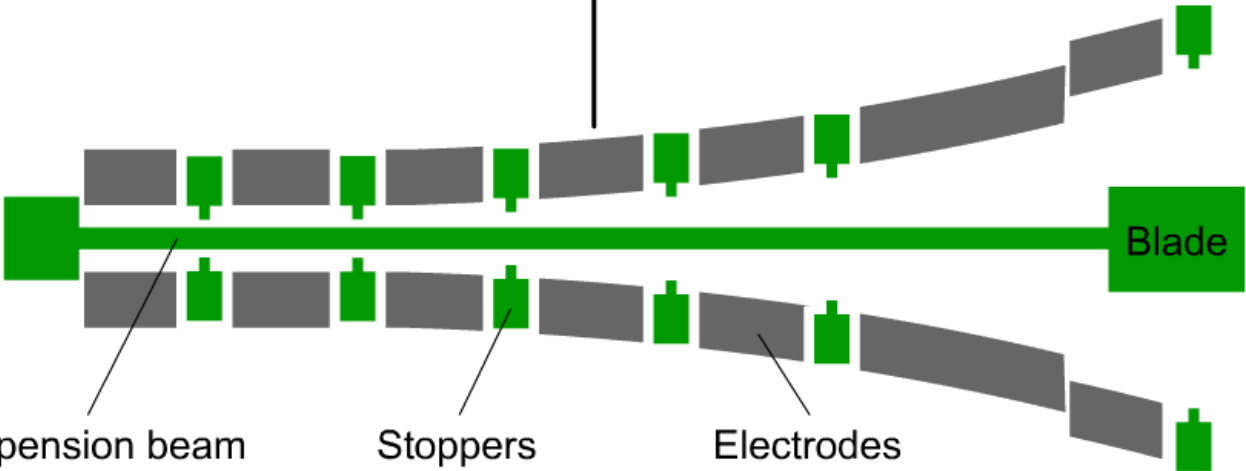
# MIKRO FRESNEL LENCSE



# MIKRO ÁRNYÉKOLÓ LEMEZ

Microshutter array on silicon chip

Switch ON



Suspension beam

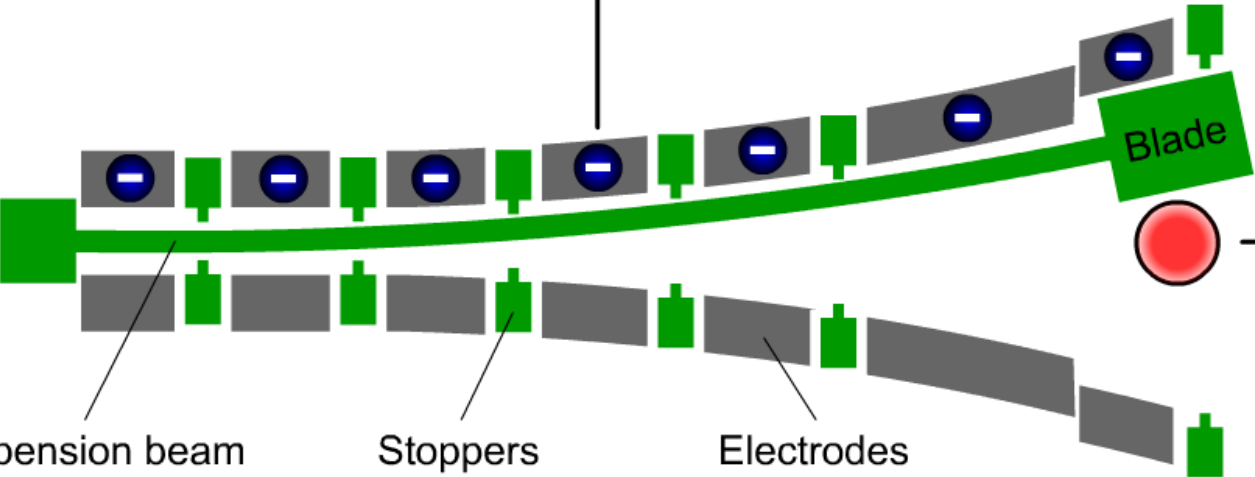
Stoppers

Electrodes

Blade

MemsEdu

Switch OFF



Suspension beam

Stoppers

Electrodes

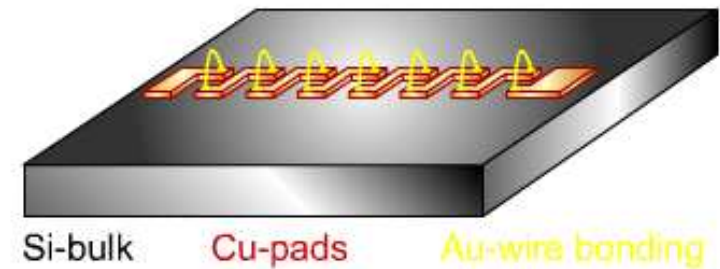
Blade



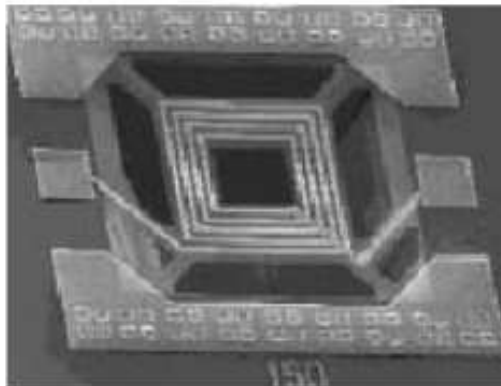
Light beam

# INDUKTIVITÁSOK

The inductor based on the combination of metal pad on Si substrate (Cu, Al or Au) and wirebonding.



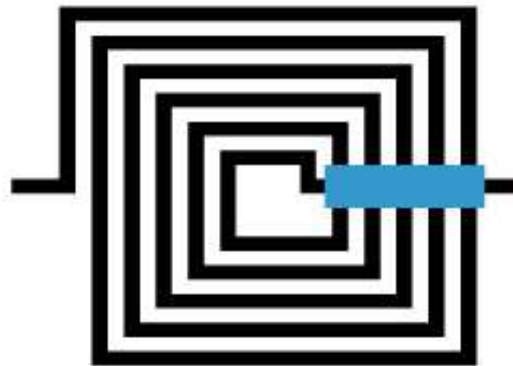
Bulk-micromachined inductor



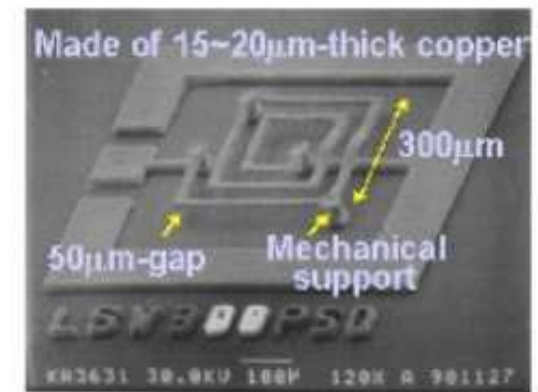
The inductor has air isolation between the convolutions.

NEXT

BACK



Sacrificial layer for insulating in the crossovers

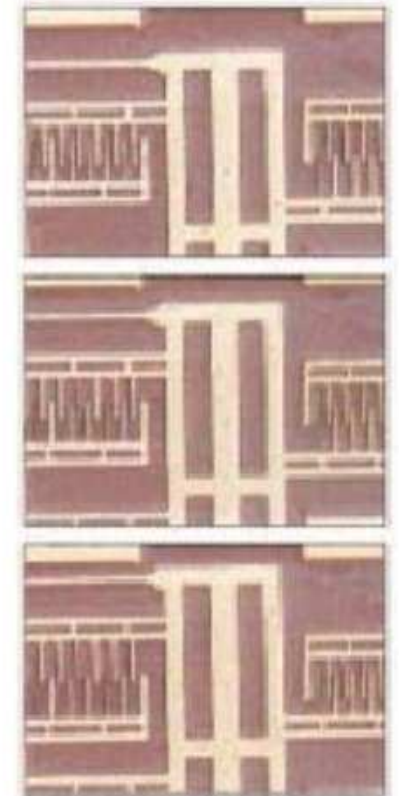
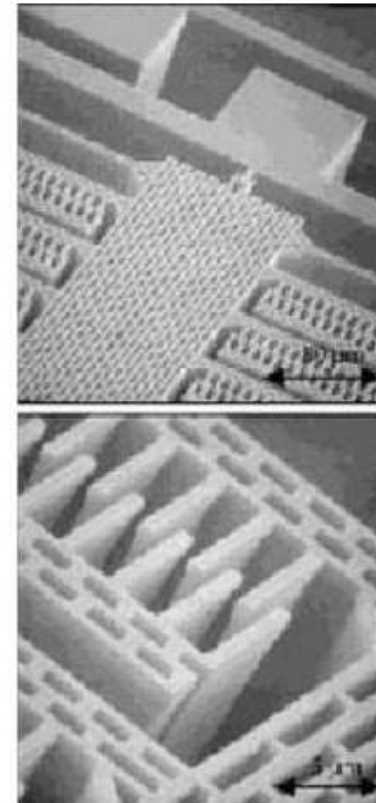
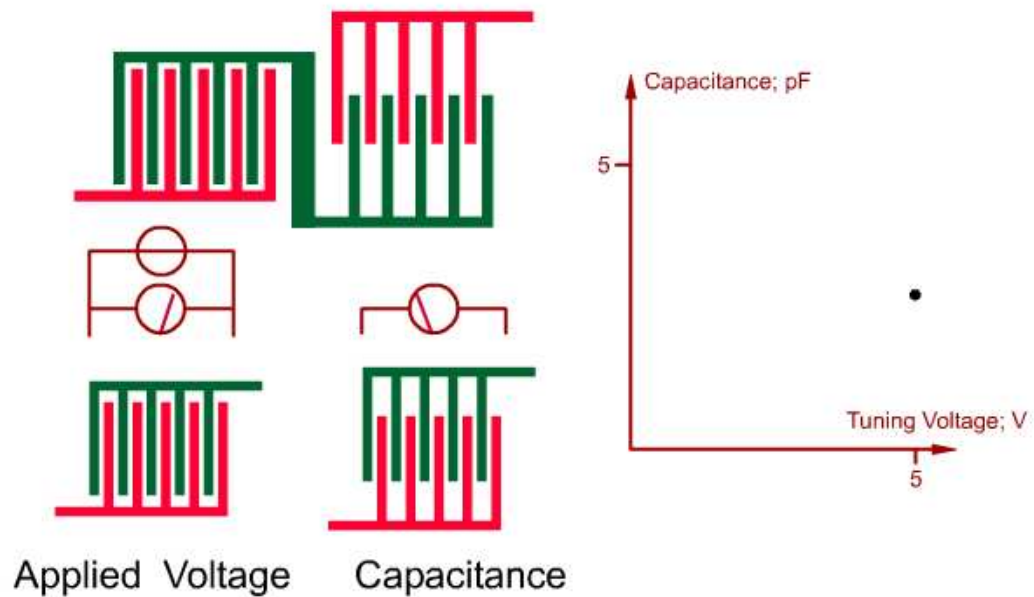




# HANGOLHATÓ VARAKTOR

Tunable capacitors based on MEMS-technology uses interdigitated structures both for tuning and for the tunable capacitor itself.

The effective area of the capacitor (right side) is varying in response of the distance changes caused by the varying electrostatic field inside the tuning unit (left side).



# Ellenőrző kérdések

Miben különböznek a MEMS rendszerek a mikroelektronikai áramköröktől?

Milyen anyagokból készülnek a MEMS szerkezetek?

Hogyan csoportosítják a mechanikai érzékelőket?

Mi a különbség a felületi és a tömbi mikromechanika között?

Mi a gyorsulásérzékelés elve?

Mi az áramlásmérés elve?

Milyen elven működnek a mikromotorok?

Mi a fésűs motor?

Mi a mikrofluidika?

Hogy működnek a mikroszivattyúk?

Hogy lehet mesterséges hidrofob felületet létrehozni?

Mi a Fresnel lencse?

Mondjon néhány példát a mikrotükrök használatára!

Milyen rádiófrekvenciás alkatrészeket hoznak létre MEMS módszerekkel?