



# Mikromechanikai eszközök és technológiák

Fürjes Péter

[www.mems.hu](http://www.mems.hu), [www.biomems.hu](http://www.biomems.hu)





# Mond valamit?

- MEMS / mikromechanika
- litográfia
- pozitív / negatív reziszt
- lift-off
- CVD / ALD
- izotróp / anizotróp marás
- RIE / DRIE





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# Szilícium technológia: a homoktól a processzorig

MEMS • BIOMEMS • NEMS



Microsystems Laboratory • Institute of Technical Physics and Material Sciences • Centre for Energy Research  
Mikrorendszerek Laboratórium • Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet • Energiatudományi Kutatóközpont

MEMS.HU  
BIOMEMS.HU

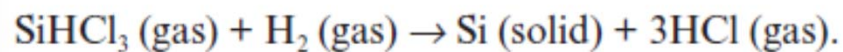
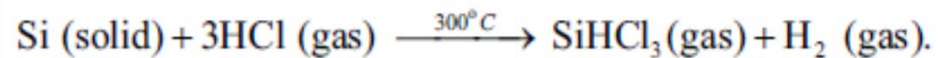
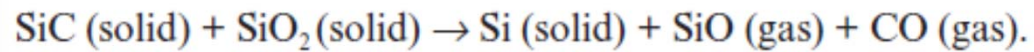


MEMS • BIOMEMS • NEMS

# A SZILÍCIUM KRISTÁLY



## Szilícium homokból



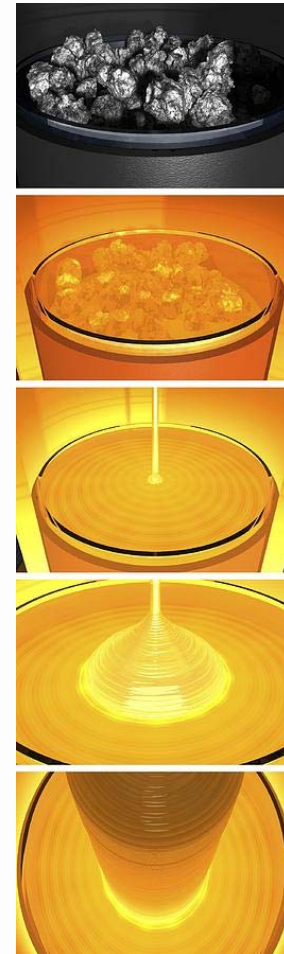
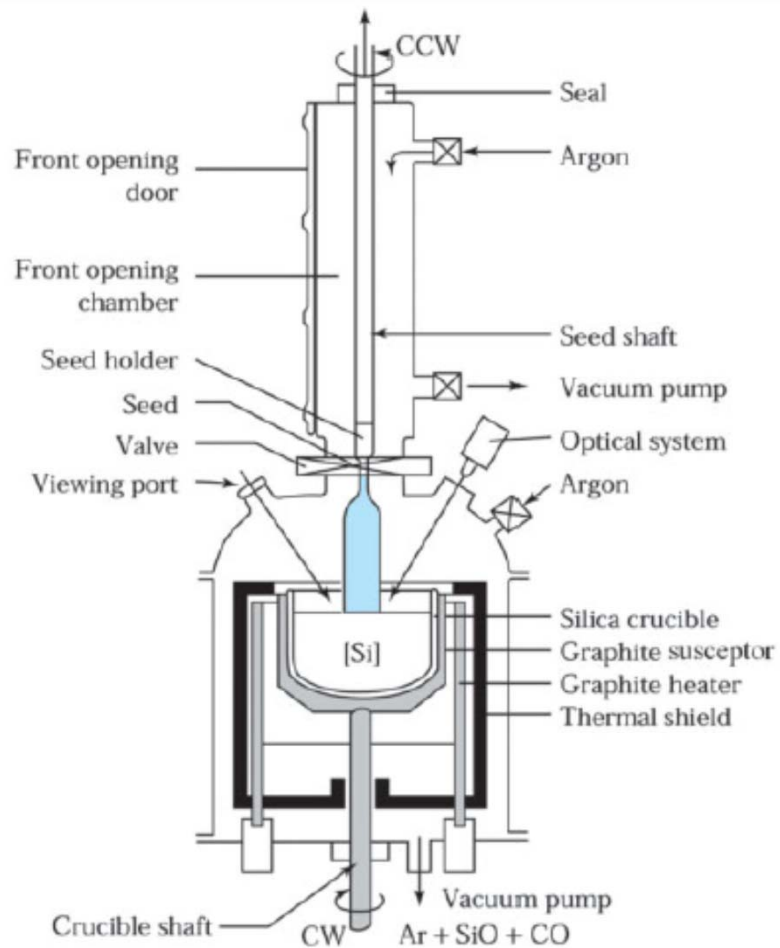
98% tisztaságú metallurgiai Si

folyadék, forráspont 32°C

elektronikai minőségű  
polikristályos Si

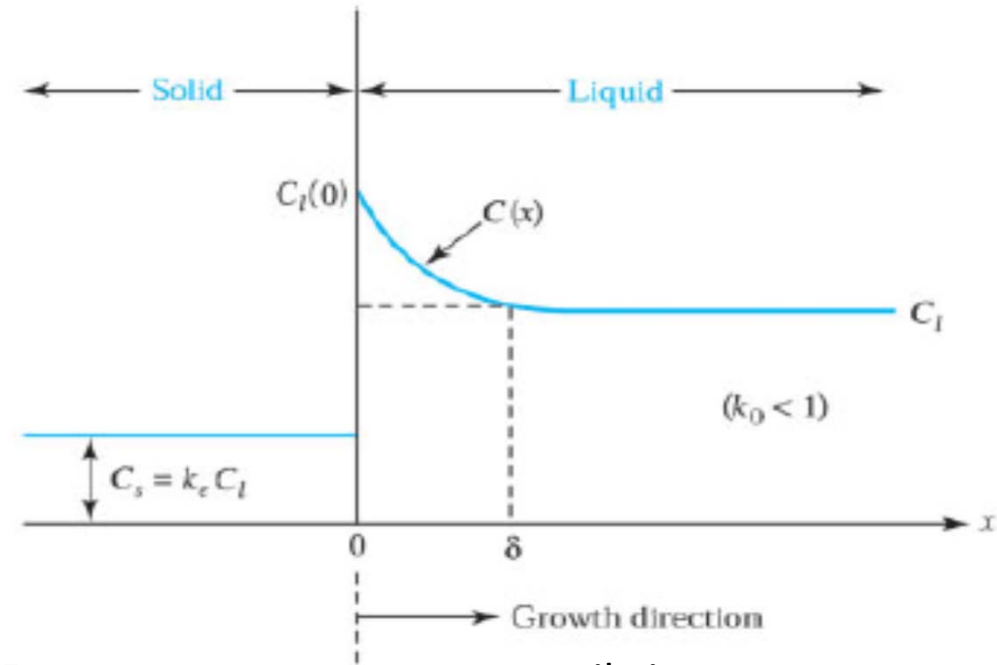
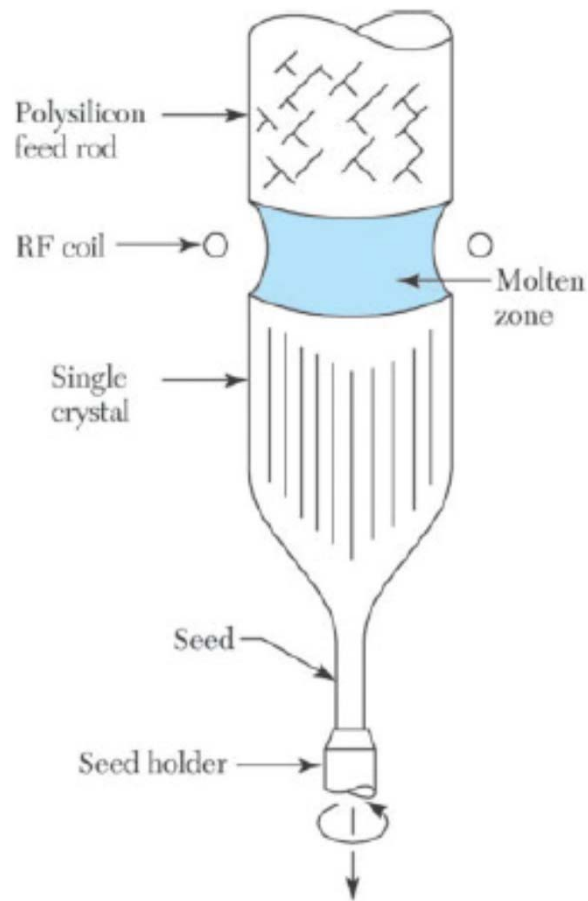
# Czochlarski módszer

olvadáspont: 1412°C



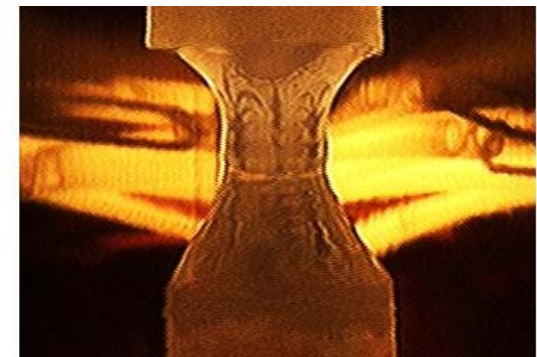


# Float-zone módszer



RF

optikai



## Szilícium szelet

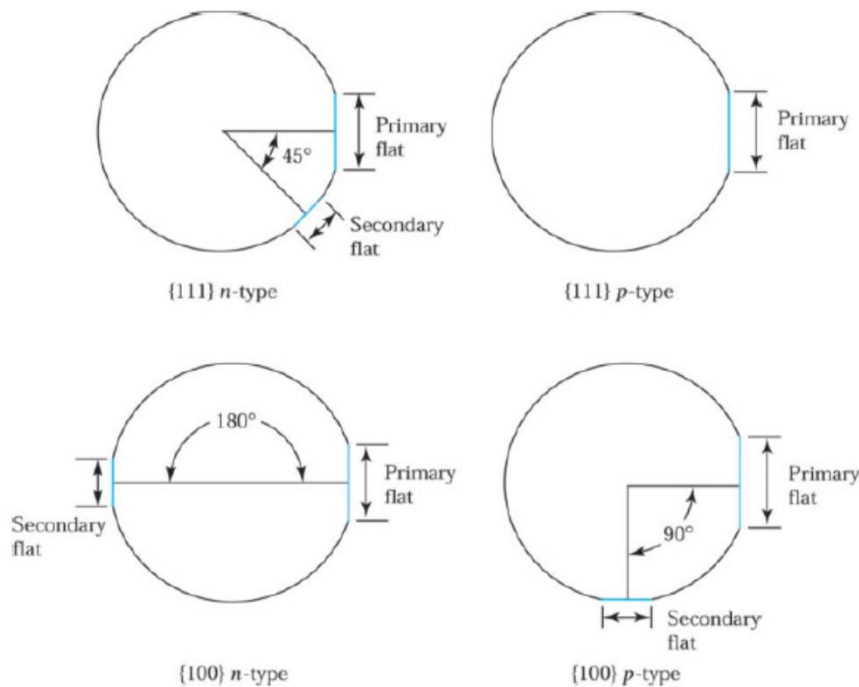
### Karakterizáció:

- röntgen-diffrakció
- SIMS



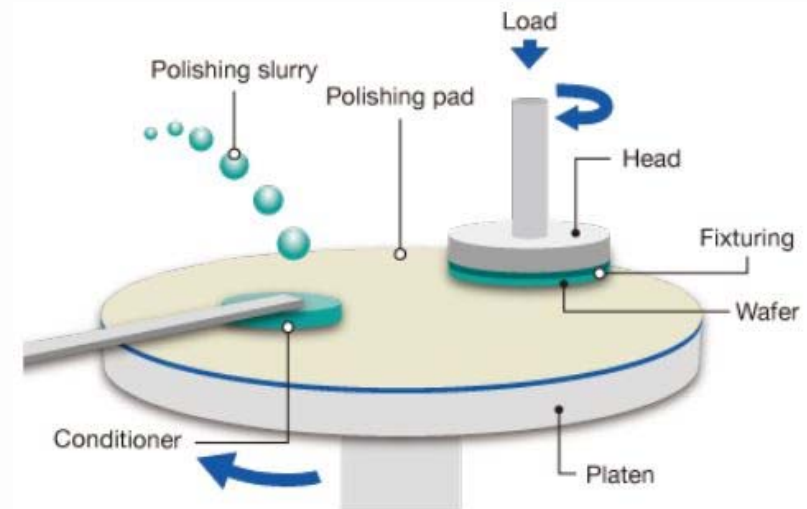
Parameter	125 mm	150 mm	200 mm	300 mm	450 mm
Diameter (mm)	125±1	150±1	200±1	300±1	450±1
Thickness (mm)	0.6–0.65	0.65–0.7	0.715–0.735	0.755–0.775	0.78–0.80
Primary flat length (mm)	40–45	55–60	NA <sup>a</sup>	NA	NA
Secondary flat length (mm)	25–30	35–40	NA	NA	NA
Bow (µm)	70	60	30	< 30	< 30
Total thickness variation (µm)	65	50	10	< 10	< 10
Surface orientation	(100) ± 1°	Same	Same	Same	Same
	(111) ± 1°	Same	Same	Same	Same

<sup>a</sup>NA: not available.



### Felület polírozása:

- CMP: kémiai mechanikai polírozás







MEMS • BIOMEMS • NEMS

# MIKROMECHANIKA



# Mikromechanika

MEMS: a „2D” IC technológia  3D szerkezetek

- membránok, felfüggesztett elemek, mozgó alkatrészek,
- mikrofluidikai alkalmazások: csatornák, üregek, reaktorok stb.

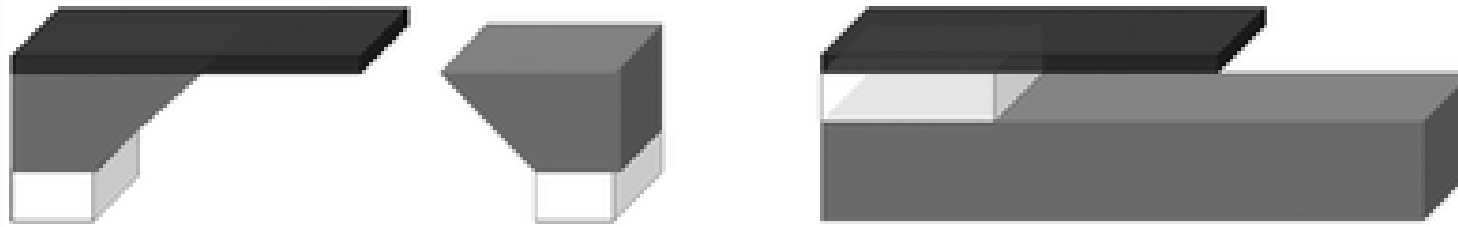
## Mikromegmunkálás:

- eljárások és eszközök:  
döntő többségében eltérnek a hagyományos mechanikai megmunkálásoktól
- elsősorban „száraz” ill. „nedves” kémiai marások és elektrokémiai módszerek,  
de klasszikus eljárások is lehetnek (lézer, v. gyémánttárcsás vágás)

jellemző méretek: 1-500  $\mu\text{m}$

Si kristály vastagsága 380-500-1000  $\mu\text{m}$

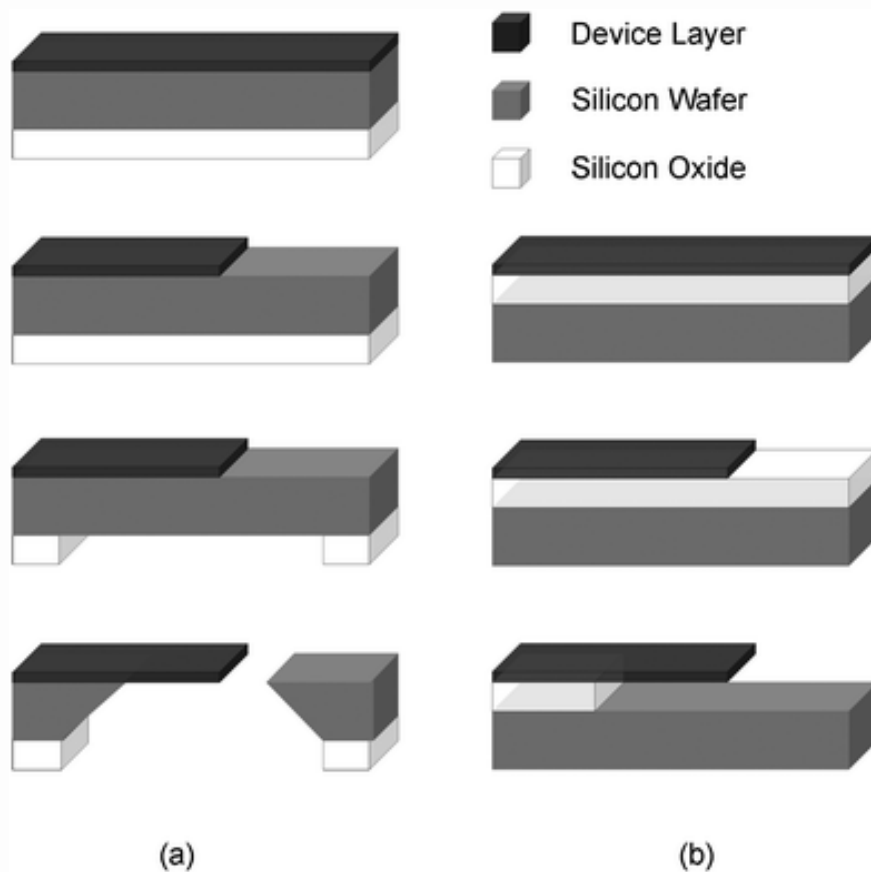
# Tömbi vs. felületi mikromechanika



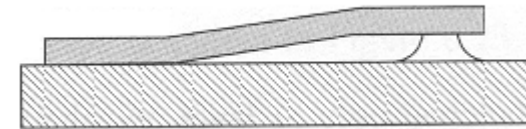
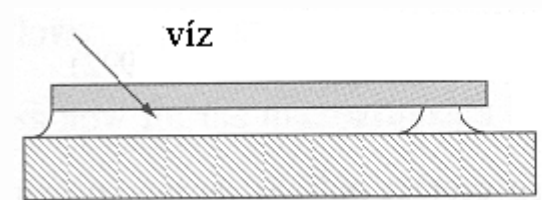
	Tömbi	Felületi
<i>Mérettartományok</i>	$2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$	$a < 2-3 \mu\text{m}$
<i>Termikus szigetelés</i>	+	-
<i>Mechanikai stabilitás</i>	+	-
<i>Membránok?</i>	egykristály	amorf v. polikristályos

harmadik lehetőség: Egykristályos anyagból a felületi mikromechanikára jellemző mérettartományok : PI. "Smart Cut, SOI – silicon-on-insulator"

# Tömbi vs. felületi mikromechanika

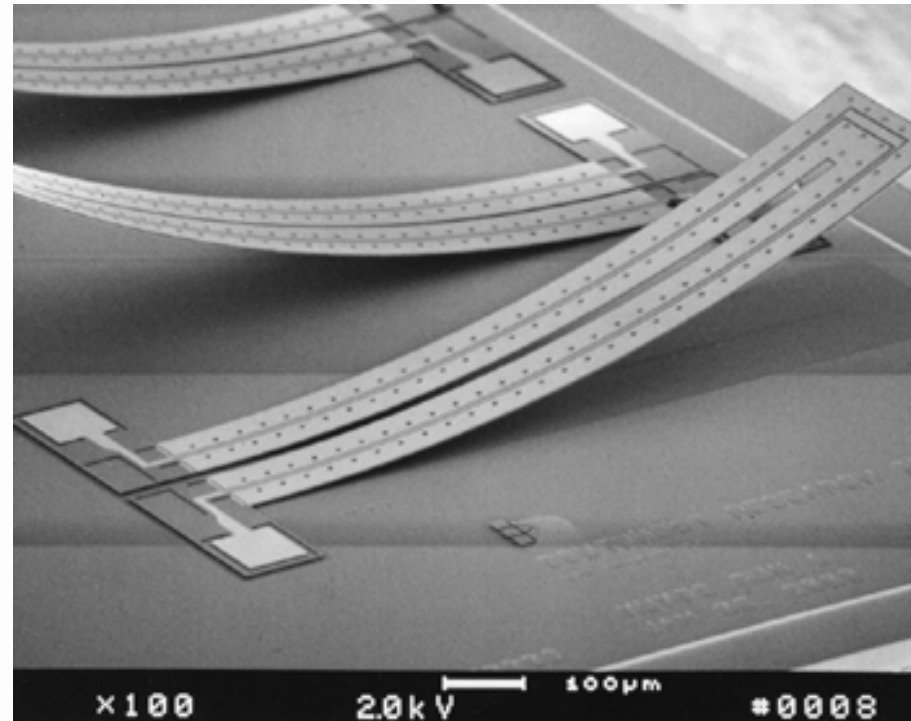
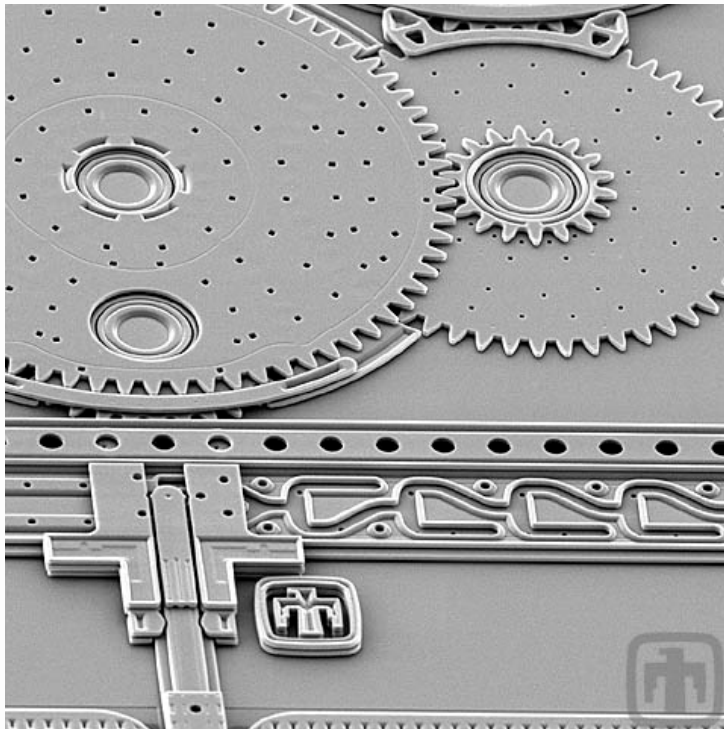


Jellegzetes hiba: letapadás



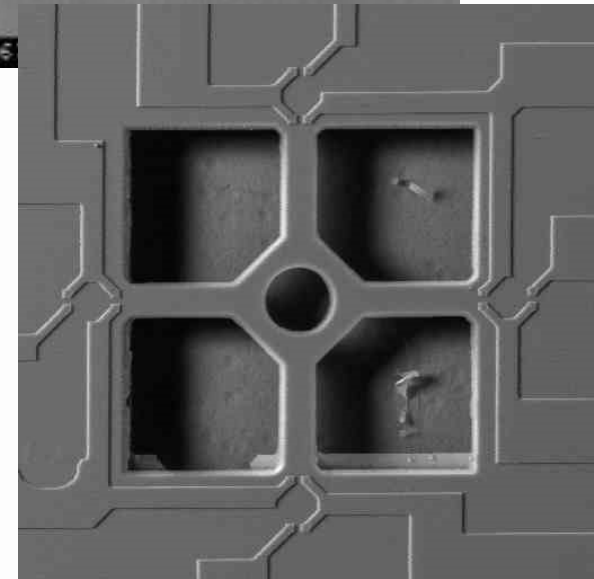
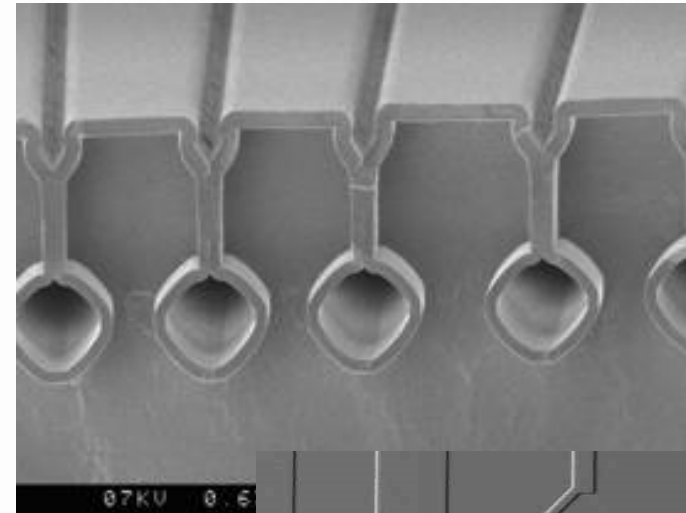
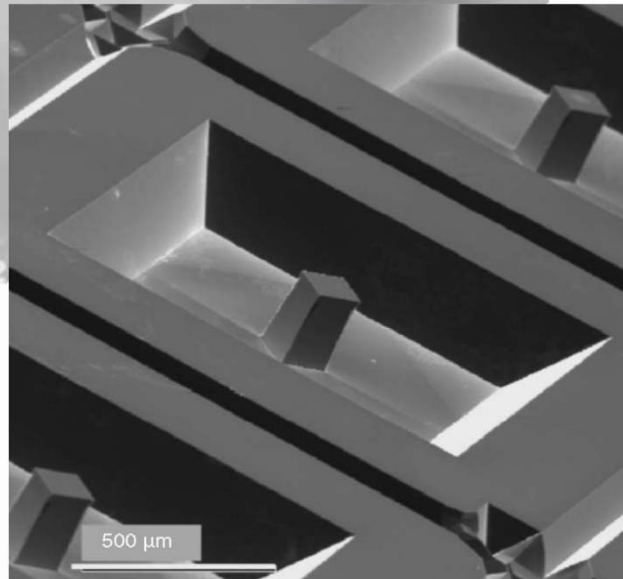
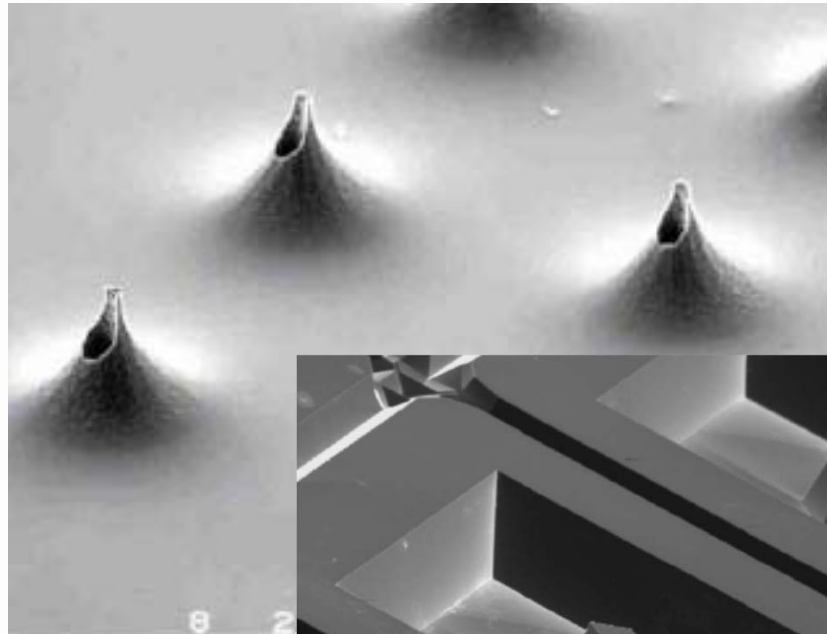
Megoldás:  
 beépített ütköző  
 vagy perforált alakzatok  
 vagy száraz marások

# Példák felületi mikromechanikára





# Tömbi mikromechanika



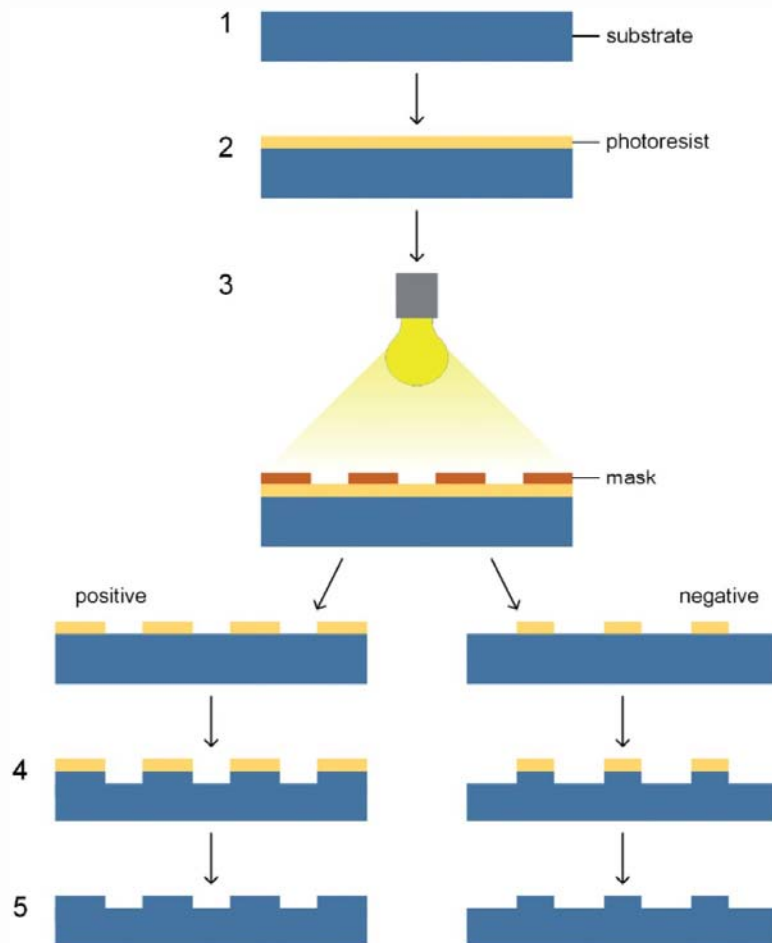


MEMS • BIOMEMS • NEMS

# LITOGRÁFIA

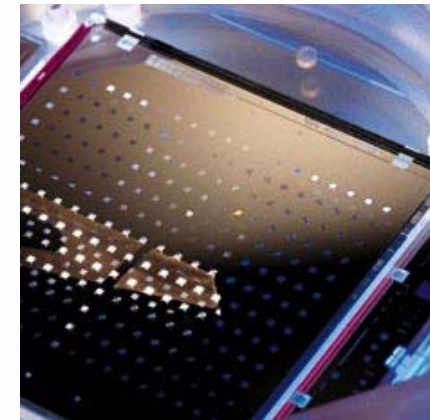


# FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



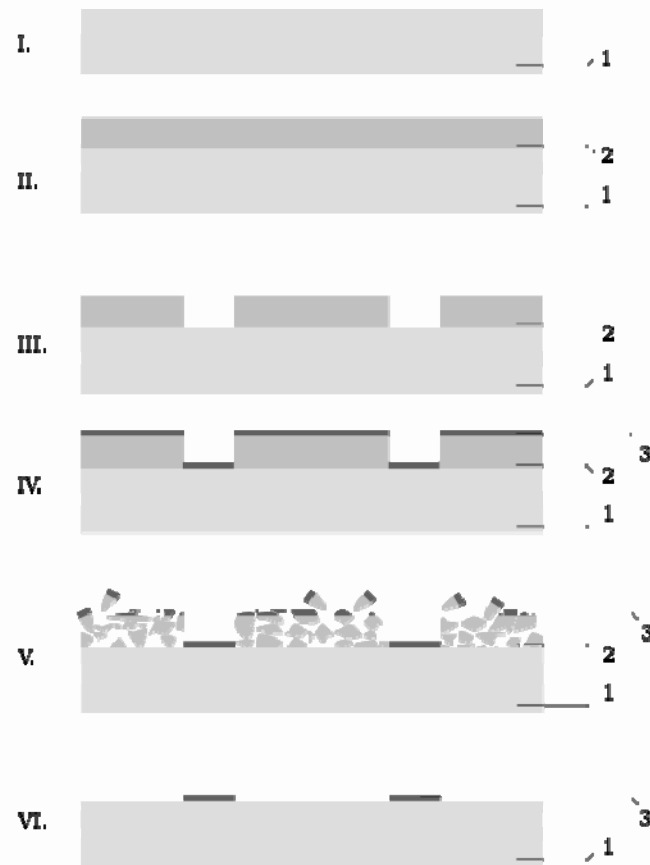
1. Megmunkálandó felület előkészítése
2. Lakkfelvitel / lakkszárítás
3. Exponálás / előhívás

Exponálást követő hőkezelés / keményítés



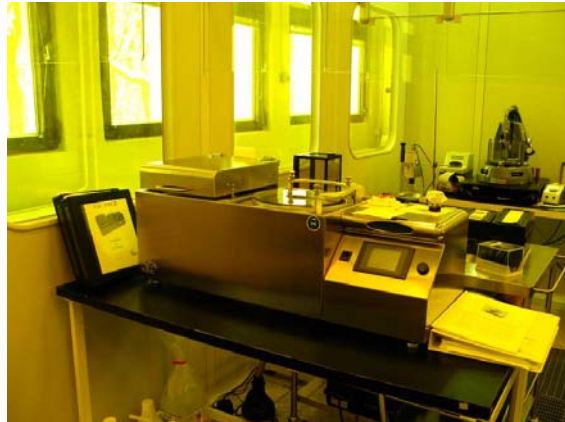
4. Megmunkálás a maszkoló fotolakk mintázat segítségével
5. Lakkeltávolítás, tisztítás

# FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR – LIFT-OFF

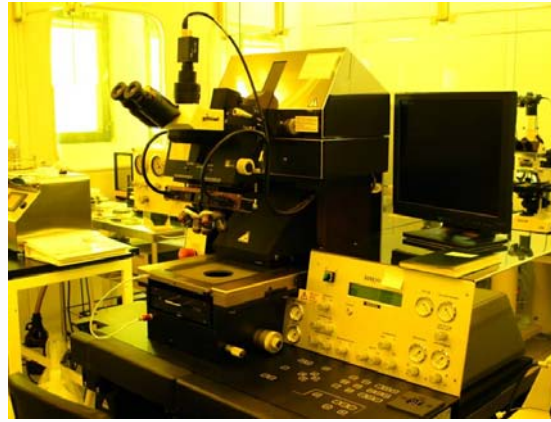


1. Megmunkálandó felület előkészítése
2. Lakkfelvitel / lakkszáritás
3. Exponálás / előhívás  
Exponálást követő hőkezelés
4. Rétegleválasztás
5. Lakkeltávolítás, tisztítás

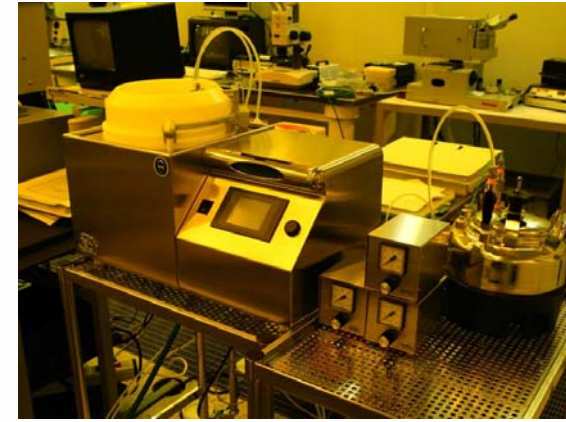
# FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



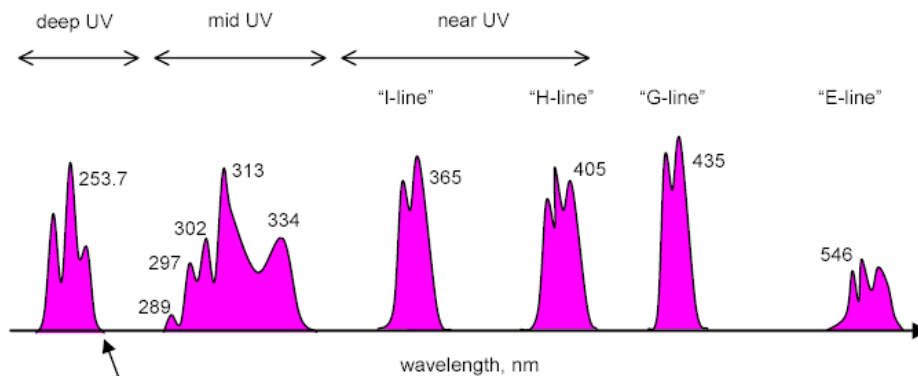
Lakkcentrifuga – hotplate



maszkillesztő / megvilágító



előhívó



Hg lámpa: 436 nm (g-line), 405 nm (h-line), 365 nm (i-line)

KrF lézer: 248 nm / ArF lézer: 193 nm

Következő generáció: extrém UV (EUV): 13.5 nm





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# RÉTEGLELVÁLASZTÁS

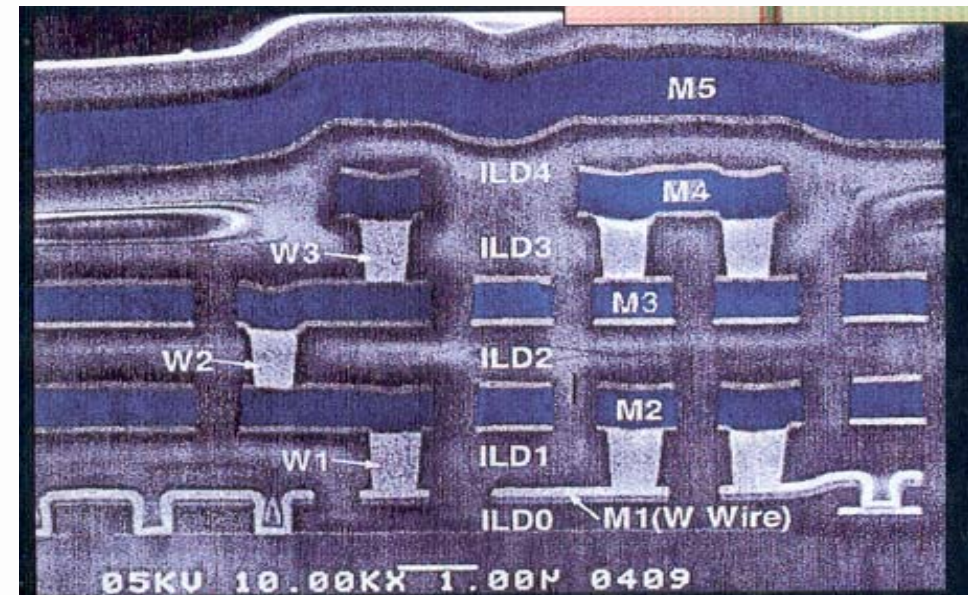


# Vékonyrétegek - felhasználás

- Mikroelektronika, félvezető gyártástechnológia
- Mikro-elektromechanikai rendszerek (érzékelők, beavatkozók, MEMS)
- Hőelvezető bevonatok (BeO, AlN, gyémánt)
- Fotovoltaikus eszközök (napelemek)
  - üveg és műanyaghordozóra leválasztott amorf és mikrokristályos Si
  - vegyület-félvezetők (CuInGaSe, CdTe)
  - Si egy- és multikristályos napelemek, (HIT)
- Optikai alkalmazások (szűrők, rácsok, antireflexiós rétegek, tükrök stb.)
- Kopásálló bevonatok
  - optikai elemek védelme (pl. leválasztott gyémántréteggel)
  - szerszámok kemény bevonata (TiN, WC, B<sub>4</sub>C, gyémánt, DLC)
  - humán protézisek bevonata
- Korrózióálló bevonatok
- Dekorációs bevonatok

# Vékonyrétegek - általános követelmények

- egyenletes vastagság a teljes szubsztráton
- homogén összetétel
- homogén szerkezet (amorf, polikristályos, epitaxiális)
- homogén fizikai és kémiai tulajdonságok
- tömörség (szivacs vs. réteg, túlyuk)
- jó tapadás
- kis termomechanikai feszültség
- speciális követelmények (súrlódás, nedvesítés, biokompatibilitás, stb..)
- gazdaságosság
  - leválási sebesség
  - berendezés karbantartási igénye
- lépcsőfedés



# Vékonyrétegek – technológiák

## Fizikai módszerek (PVD, Physical Vapour Deposition)

szilárd forrásból:

párolgatás

porlasztás: dc, rf, magnetron

MBE (Molecular Beam Epitaxy)

olvadékból:

LPE (Liquid Phase Epitaxy)

(egykristály húzása, Czochralsky, Floating zone)

## Kémiai módszerek

elektrolitból:

galvanizálás

(oldatból, szuszpenzióból:

lecsapatás, szol-gél technika)

gázfázisból:

**CVD (Chemical Vapour Deposition)**

VPE (Vapour Phase Epitaxy)

MOCVD (Metal Organic ....)

**LPCVD (Low pressure...)**

PECVD (Plasma enhanced...)

MWCVD (MicroWave...)

PACVD (Photon assisted..., néha plasma assisted)

**ALCVD (Atomic Layer.. ALD(ep..), ALEpitaxy)**



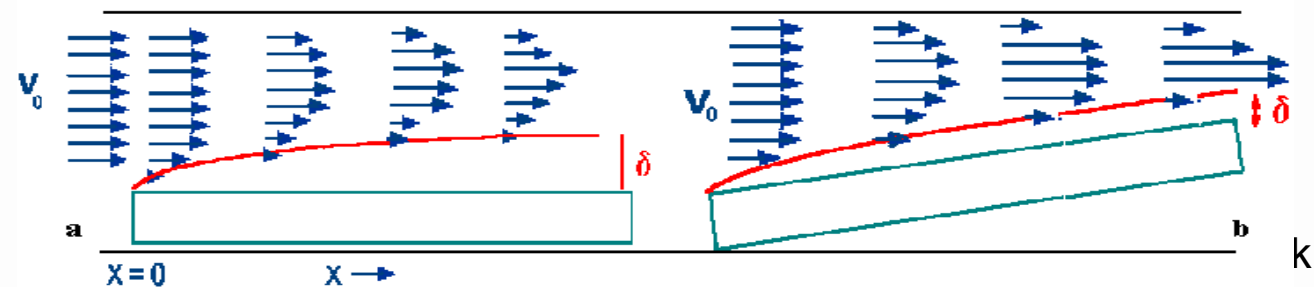


# Atmoszférikus CVD - APCVD

- Alacsony szabadúthossz
- Sebességmeghatározó: transzport (reagens vagy termék)
- Termikus aktiváció

$$\delta(x) = (\mu x / \rho v_0)^{1/2}$$

$\mu$  kinematikai viszkozitás  
 $\rho$  a sűrűség

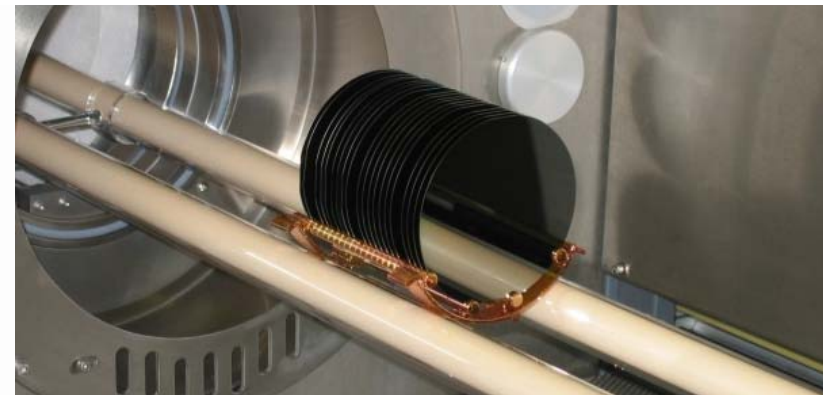
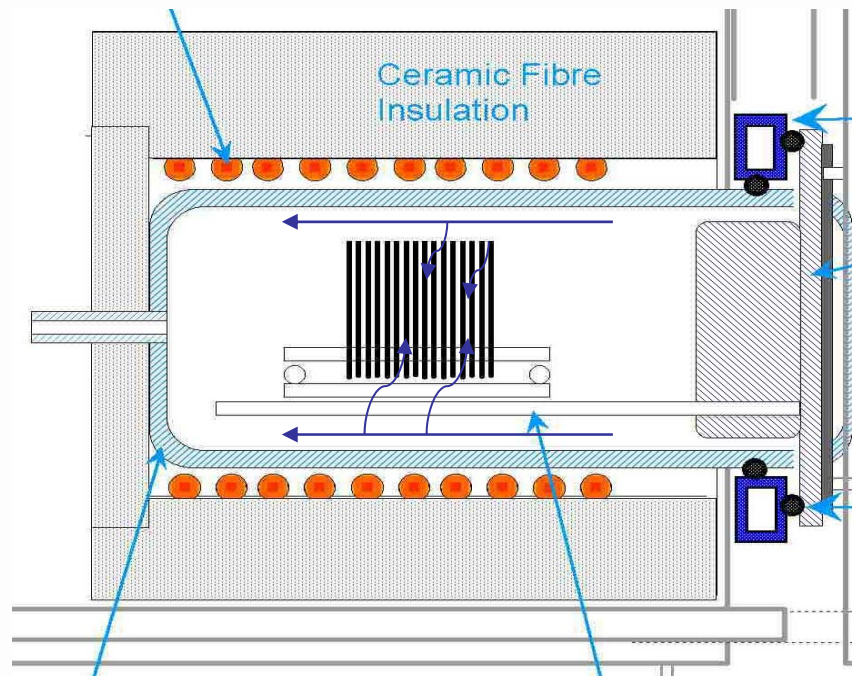


egyenletesség  $\pm 10\%$ , főleg egyszeeletes reaktorok

- $\text{SiO}_2$ : szilán és oxigén / 450oC

# Alacsony nyomású CVD - LPCVD

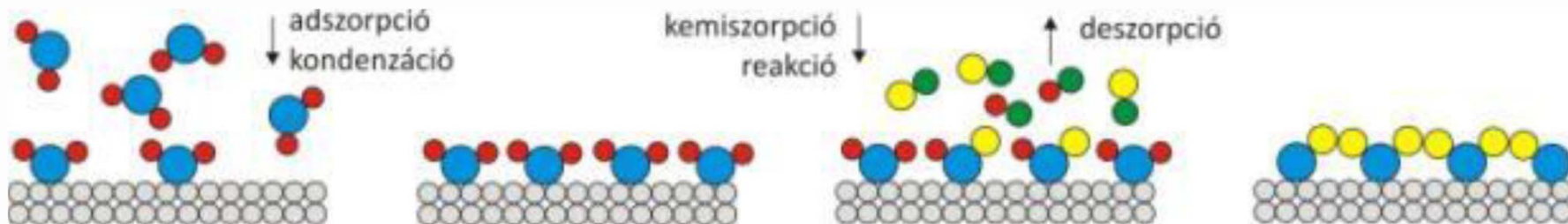
- Nagy szabadúthossz
- Sebességmeghatározó: kémiai reakció
- Termikus / plazma aktiváció



egyenletesség  $\pm 2-6\%$ , batch és egyszeletes reaktorok

# ALD – atomi réteg leválasztás

- Sebességmeghatározó: kemisorpció
- Termikus / plazma aktiváció



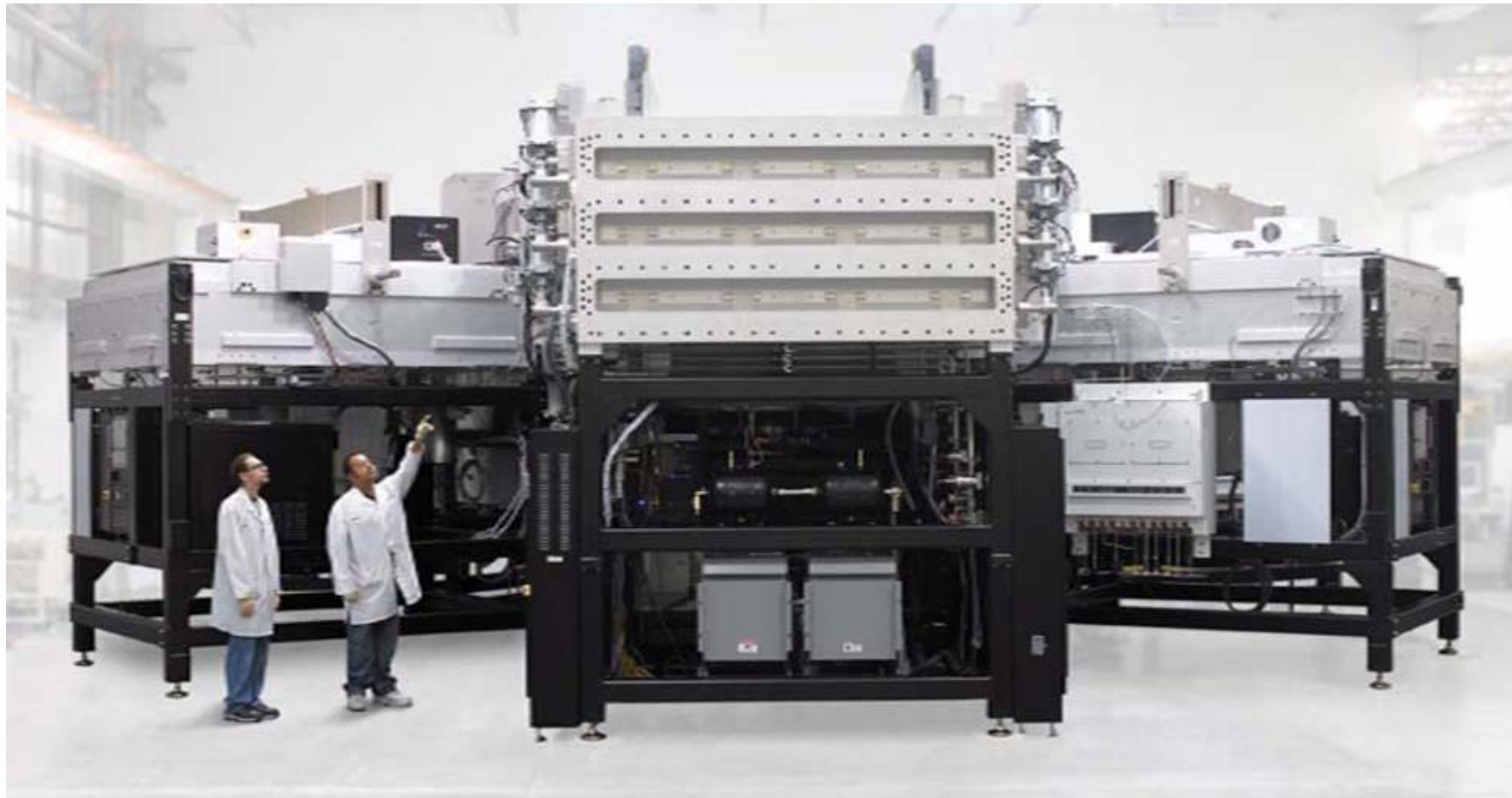
- atomi pontosság
- nagy homogenitás
- kiváló lépcsőfedés
- batch és egyszeteles reaktorok

Jellemző anyagok:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{HfO}$ , ...





# Vékonyrétegek – technológiák





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# MARÁSOK

MEMS • BIOMEMS • NEMS





# Kémiai marások

**Marás:** szilárd anyag eltávolítása a szubsztrátból kémiai reakció által

**Reagens:** folyadék vagy gáz (vagy gőz, plazma)

**Nedves marás:**

- kémiai reakció a folyadék/szilárd interfészen, a mi a szilárd anyag kioldásával jár

**Száraz marás:**

- gáz vagy gőzfázisú reagens **magas hőmérsékleten**
- gőzfázisú reagens **alacsony hőmérsékleten és nyomáson, RF indukált plazma** kisüléssel generált extrém nagy reaktivitású aktív részecskékkel (szabad gyökök vagy gerjesztett neutrális részecskék) – izotróp marás
- fizikai és irányított (anizotróp) marás a szubsztrát atomjainak és molekuláinak kevésbé **szelektív porlasztása**

# Kémiai marások – technológiai alkalmazások



# Kémiai marások – alkalmazása félvezetőiparban

## Félvezető szeletek kialakítása

- Mechanikai sérülések eltüntetése kémiai polírozással
- Magas minőségű felület kialakítása kémiai-mechanikai polírozással

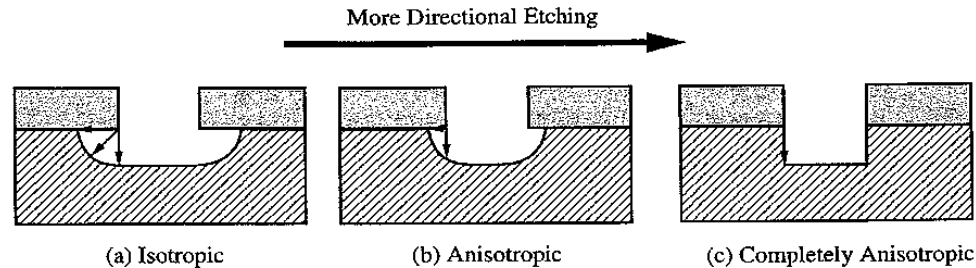
## Szeletprocesszálás

- Fotoreziszt hívás
- Oxidok és nitridek szelektív vagy teljes eltávolítása
- Fémek mintázása
- Szerves rétegek szelektív vagy teljes eltávolítása
- Kontúr marás: tervezett alámarási profil
- Si anizotróp marása MEMS szerkezetekben
- Polikristályos Si marása MOS szerkezetekben (poly-gate)

**Analitikai alkalmazás:** pl. hibák felderítése (tűlyuk, kristályhiba)

**Félvezető eszköz tokozás:** pl. fémfelületek frissítése, stb...

# Marások szerepe a mikrotechnológiában



Cél:

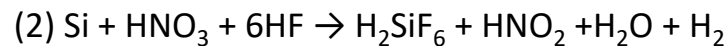
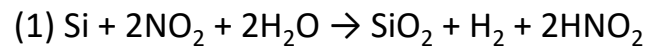
3D struktúra kialakítása

**Figure 10-3** Etch profiles for different degrees of anisotropic, or directional, etching: (a) purely isotropic etching; (b) anisotropic etching; (c) completely anisotropic etching.

## Nedves marás

- Folyékony marószer
- Kémiai folyamat

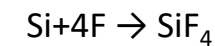
Si nedves kémiai marása:  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  elegyében



## Száraz marás

- Gáz fázisú marószerből plazma
- Kémiai és fizikai folyamat

Si száraz marása: halogén alapú plazmákban



# Nedves kémiai marások

## A marási eljárásokkal szemben támasztott követelmények:

- egyenletes marási sebesség a teljes hordozó felületén
- nagy szelektivitás a maszkoló rétegre (általában fotolakk, de más is lehet)
- nagy szelektivitás a hordozó rétegre ( $v_{\text{réteg}}/v_{\text{hordozó}} > 10..100$ )
- a marandó vékonyrétegek tipikus méretének megfelelő marási sebesség ( $\approx 0,1-1 \mu\text{m}/\text{perc}$ )
- lehetőleg kémiai reakció kontrollált legyen (nem transzportfolyamat által)



# Nedves marások technológiái

## Immerziós marás

- Nagy szeletszám / gazdaságosság
- Sebességkontrol: hőmérséklet / keverés (buborékok: keverés / ultrahangos kád)

## Spray marás

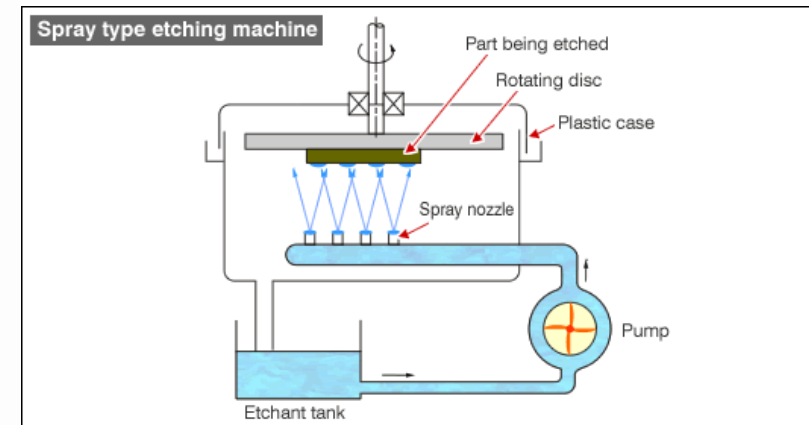
- Hatékony sebességkontrol (paraméterek: porlasztási cseppméret és nyomás)
- Megnövelt marási sebesség a folyamatosan friss marószer miatt
- Kevés szelet

## Kemo-mechanikai marás

- Szeletpolírozás (Si szelet vagy polimerek)

## Elektrokémiai marás

- Szelektivitás és sebességkontrol (paraméterek: potenciál vagy áram)



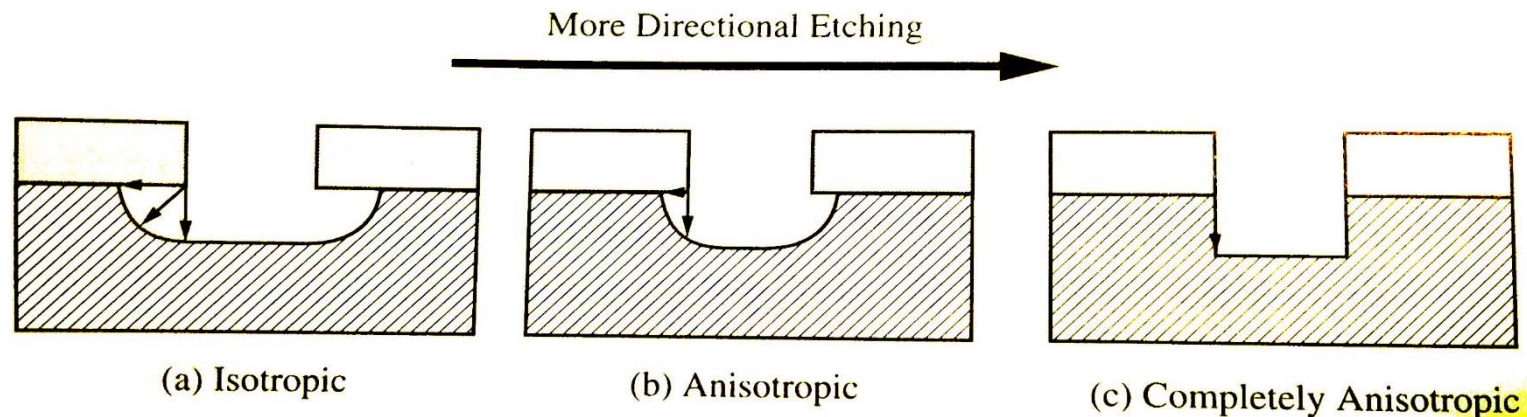
# Nedves marások sebesének irányfüggése

## Izotróp marás: a reakciósebesség irányfüggetlen

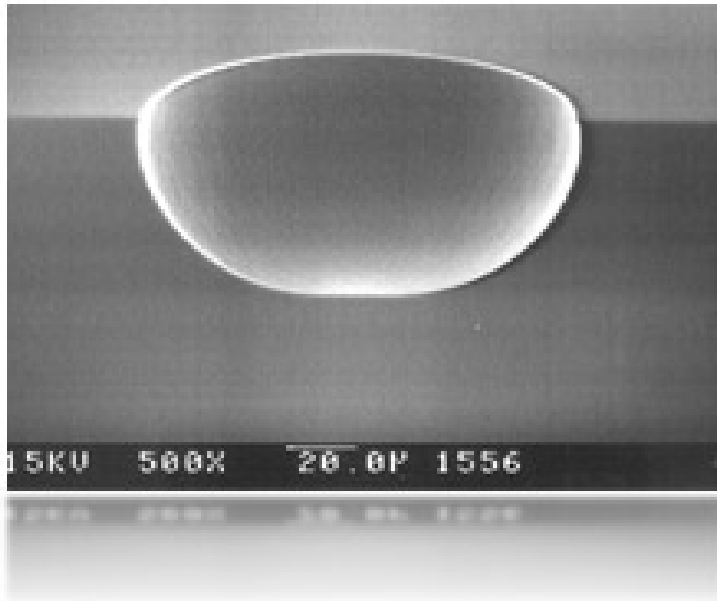
- Amorf és polikristályos anyagok marása jellemzően izotróp
- Jellemzően diffúziólimitált folyamatok

## Anizotróp marás: a reakciósebesség irányfüggő

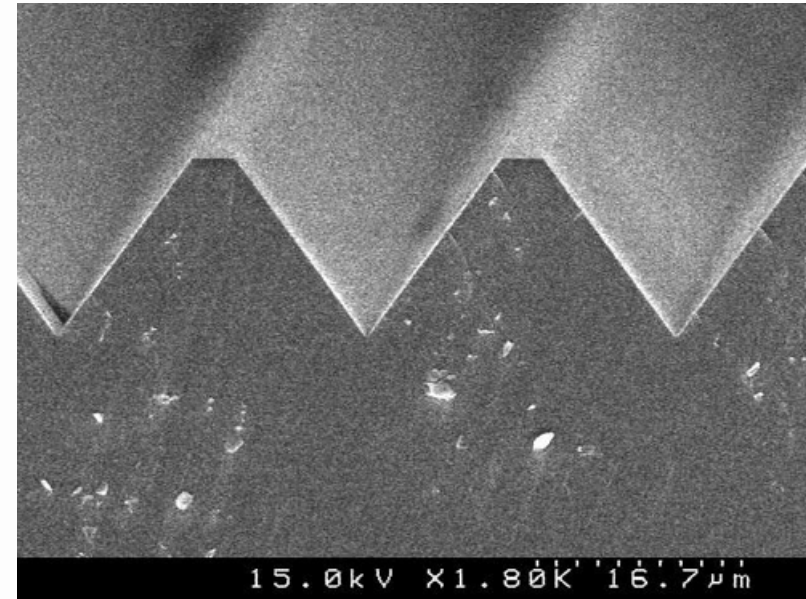
- Kristályos anyagok marása lehet izotróp és anizotróp a marószer összetételétől és a reakciókinetikától függően
- Jellemzően reakciólimitált folyamatok



## Szilícium marása



Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség (pl. poli-maró - HF-HNO<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>COOH )

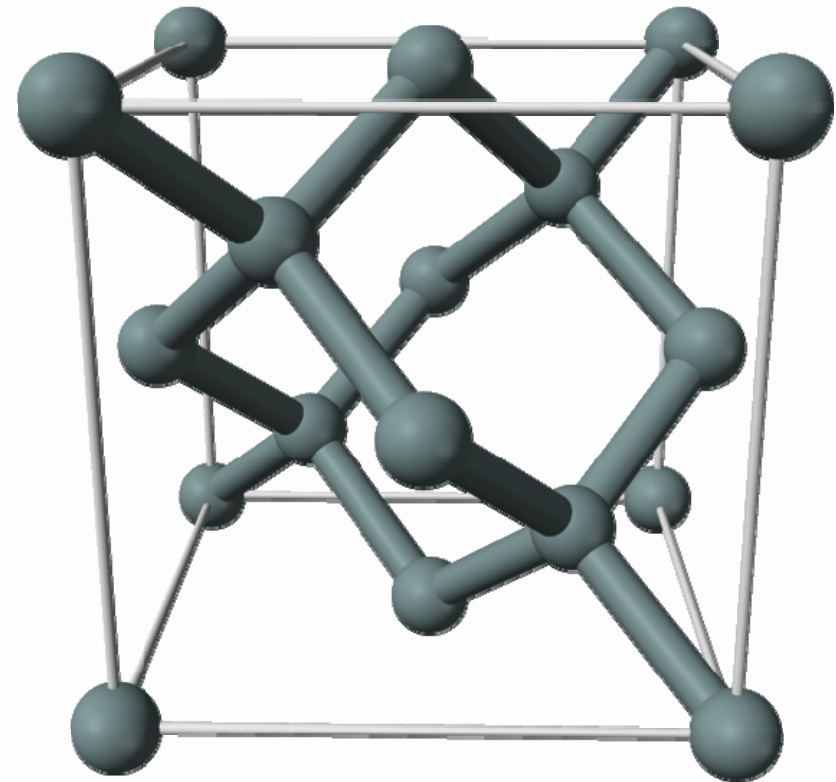
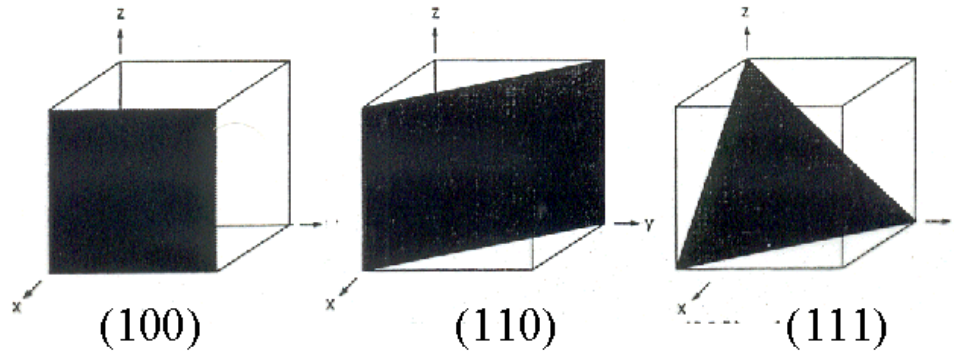


Anizotróp: a különböző kristálytani irányokban más és más a marási sebesség (pl. lúgos maró – KOH)

# Marási sebesség irányfüggése

Szilícium rácsszerkezete: gyémántrács

Legegyszerűbb kristálytani síkok:

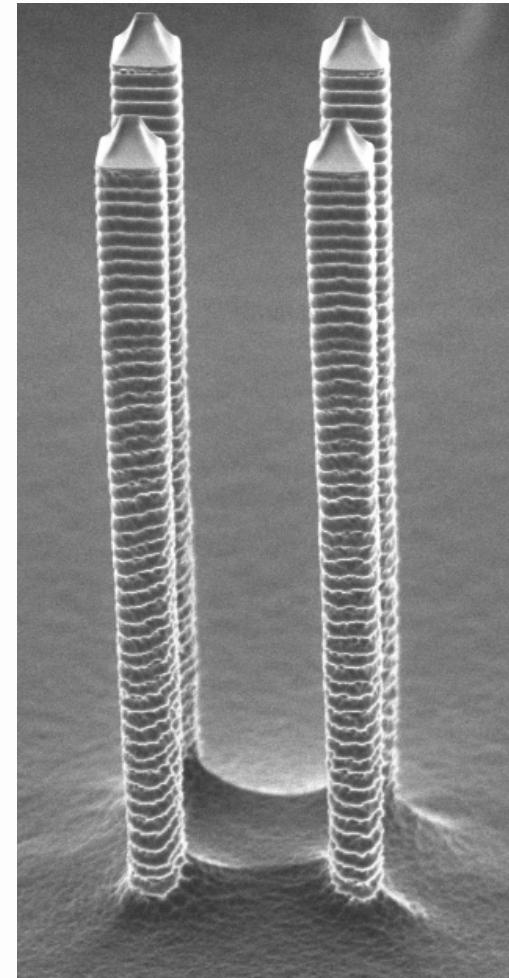
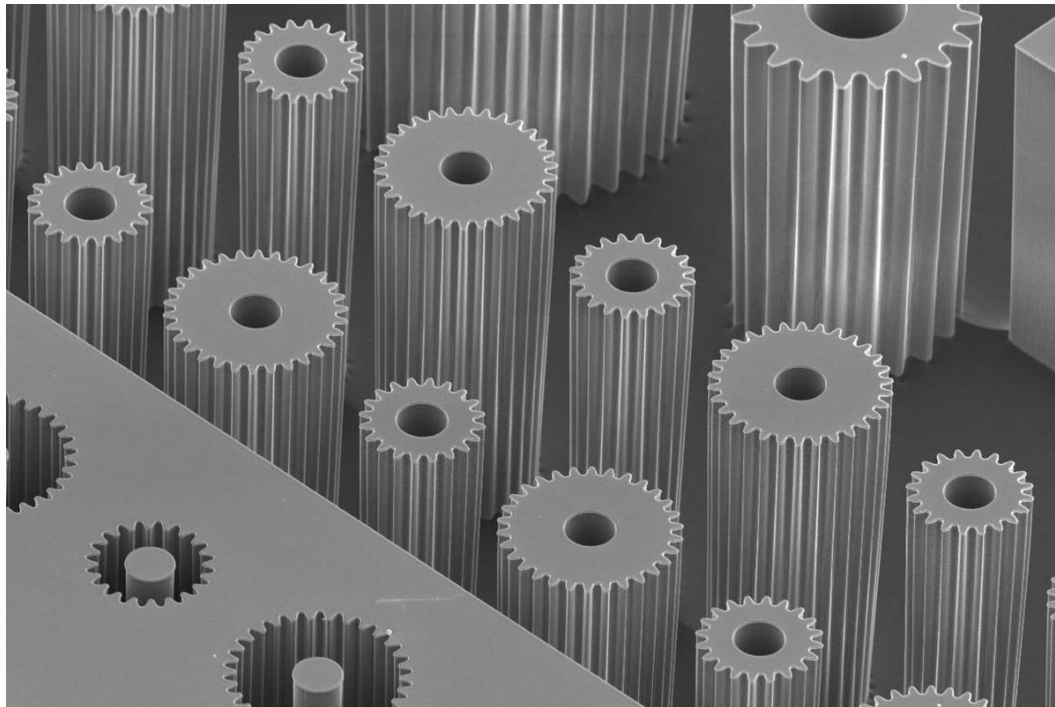


Si-Si kötési energia:  $E_{\sigma(\text{SiSi})\langle 111 \rangle} \gg E_{\sigma(\text{SiSi})\langle 100 \rangle} > E_{\sigma(\text{SiSi})\langle 110 \rangle}$

Marási sebesség:  $v_{\langle 111 \rangle} \ll v_{\langle 100 \rangle} < v_{\langle 331 \rangle}$



# Szárazmarások

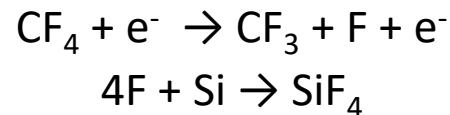






## Kémiai marás

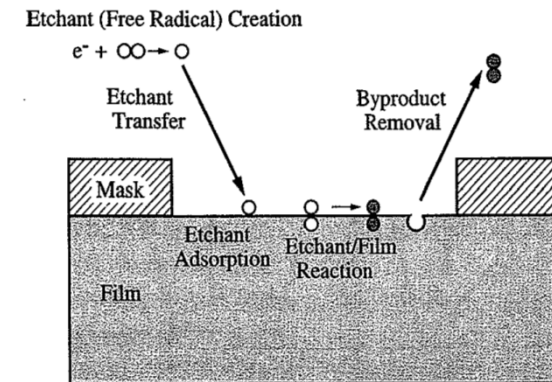
Szabad gyökök (semleges, nemkötő elektronnal rendelkezik) – igen reaktív



A reakciótermékeknek **el kell távoznia** a felületről, hogy a marás folytatódhasson - volatile

**Adalék gázok** segíthetik a több reaktív szabad gyök képződést, ezzel növelhetjük a marási sebességet!

*pl. O<sub>2</sub> gáz a disszociált CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>-vel reagál, ezzel megakadályozza a rekombinálódást CF<sub>4</sub>-gyé, ezzel növeli a szabad F jelenlétét DE: túl sok O<sub>2</sub> túlságosan felhígítja a maró gázt!*



**Figure 10-10** Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

**Izotróp** a marás, mert

1. Izotróp a sebesség szögeloszlása
2. Kis felületi tapadási együttható (rengeteget „barangol”, míg reagál)

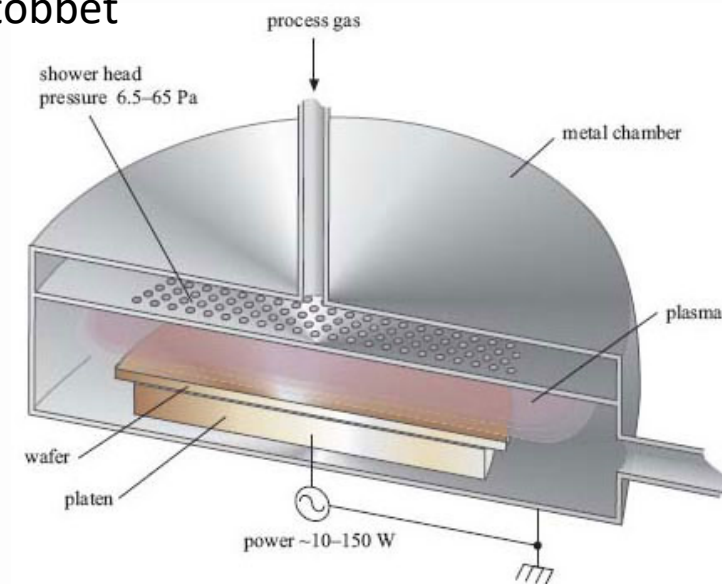
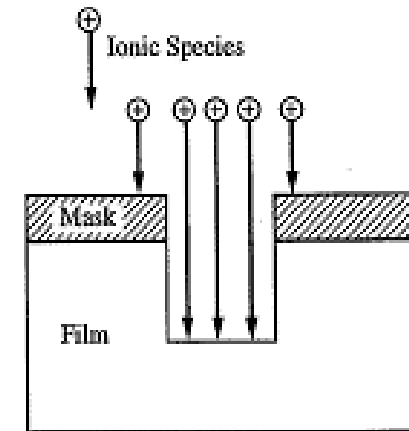
**Nagy szelektivitás érhető el**

# Fizikai marás

- $V_p$  miatt a pozitív ionok gyorsulnak az elektródák felé (az egyiken ül a szelet is)
- Anizotróp:
  - Az elektromos tér irányítottsága miatt a beérkező ionok irányítottan marnak
  - A tapadási együttható nagy – ha beüt mar, többet nem üt be
- Szelektivitás rossz

## Technológiák:

- Porlasztás vagy ionmarás
- Ionsugaras marás (FIB)
- Mágnesesen lokalizált ionmarás



# Ion-segített marás

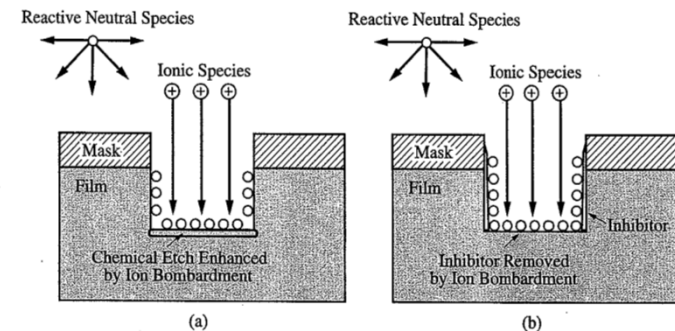
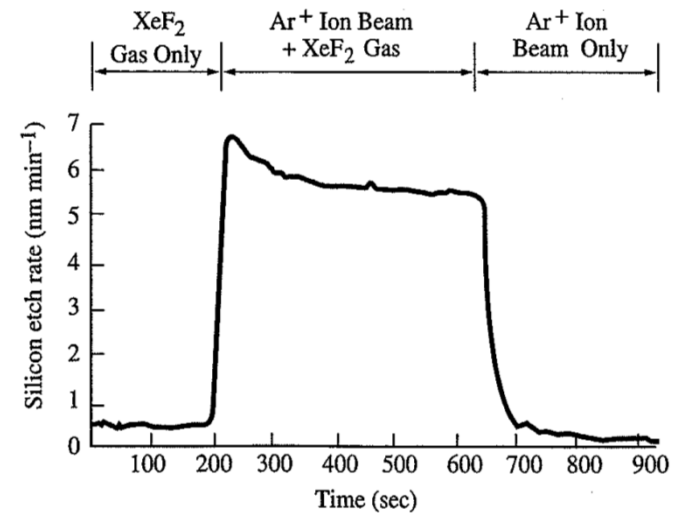
**Kémiai-fizikai száraz marás (a két folyamat kombinációja)**  
 Ionok + semleges szabad gyökök nem függetlenül marnak:

- Növelheti a **szelektivitást** és az **orientációfüggő reakciósebességet**
- Marási sebesség nem az összeg (sokkal nagyobb)
- Profil nem a lineáris kombináció, hanem a fizikai marásra jellemző, (a vertikális marási sebesség nő)

**Az ionbombázás a kémiai marás valamelyik komponensét segíti** (felületi adszorpció, marási reakció, reakciótermék képződés/eltávolítás), de anizotrópan

## Technikák:

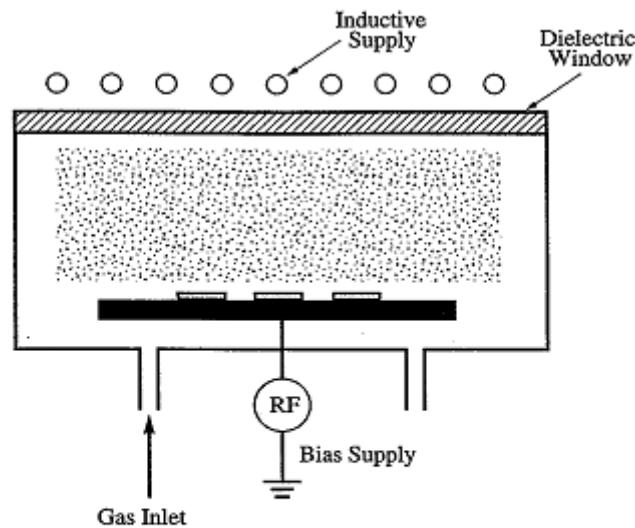
- Reaktív ionmarás, porlasztás
- Reaktív ionsugaras marás
- Kémiaileg segített ionsugaras marás



**Figure 10-13** Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

# Plazma maró berendezések

## HDPE - High Density Plasma Etching



**Figure 10-16** Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **Plazma sűrűség és Ion energia** egymástól függetlenül
- ECR (electron-cyclotron-resonance) vagy ICP (inductively coupled plasma) forrás  $10^{11}$ - $10^{12}$  ion/cm<sup>3</sup> sűrűségű plazmát, nagy sheath bias nélkül - így lehet kisebb nyomásokat használni 1-10 mTorr – még jobban irányított a marás (kevesebb ütközés a sheath-ben)
- RF forrás előfeszíti a szeletet, ez határozza meg a becsapódó ion energiáját, amit tarthatunk alacsonyan a nagy ionsűrűség mellett is – kisebb szubsztrát károsodás
- nagy marási sebesség: néhány  $\mu\text{m}/\text{min}$

A hatás olyan, mint az ion segített marásnál!



# DRIE Intro

## DRIE – Deep Reactive Ion Etching

Marási mélység : árok szélessége > 10:1 (MEMS, DRAM kapacitások)

Két teljesítmény forrás:

- ICP a nagy reaktív gyök + ion sűrűség képzéshez
- CCP DC self-bias az ion energia meghatározásához

## Si DRIE

Gáz összetétel: halogén alapú plazmákkal gyors a marás

- F-alapú, (pl.  $SF_6$ ) gyors izotróp marás
- Cl-, Br-alapú (pl.  $Cl_2$ ,  $HBr$ ) ion segített marással anizotróp, de lassabb és mérgező

Mixed mode DRIE / Cryo

$SF_6 + O_2$  @ cryo °C

Pulsed mode DRIE / Bosch

$SF_6 + C_4F_8$  @ RT

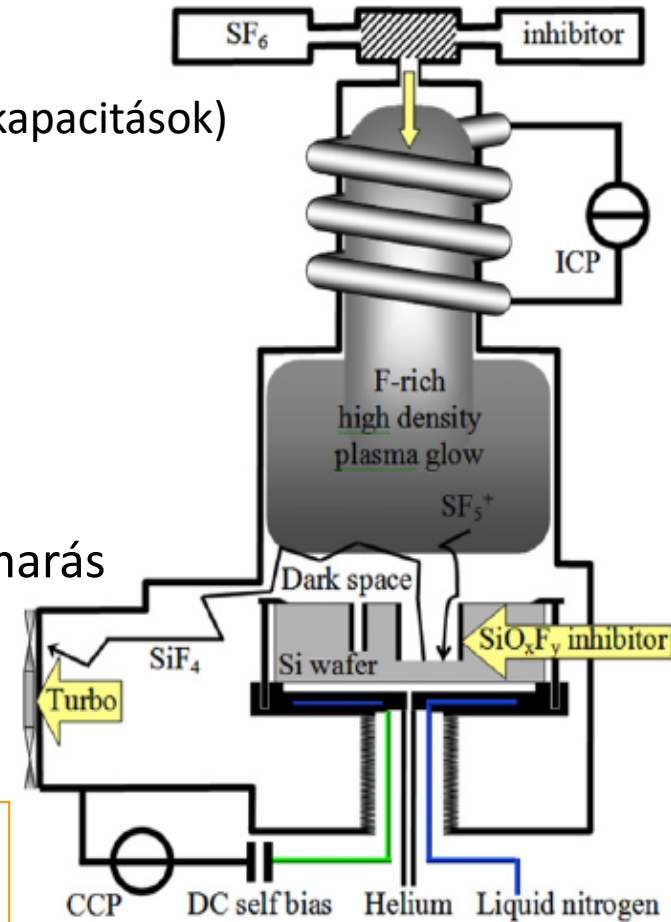
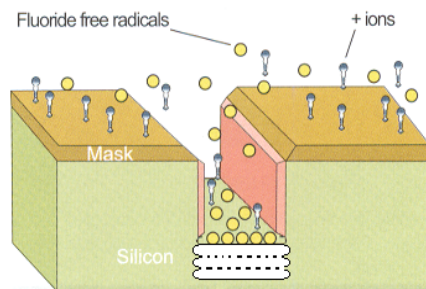
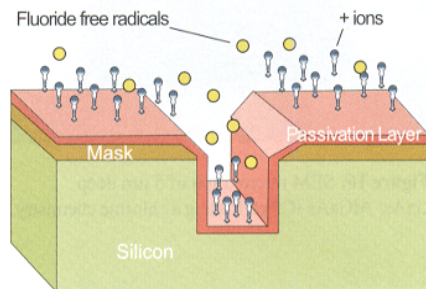
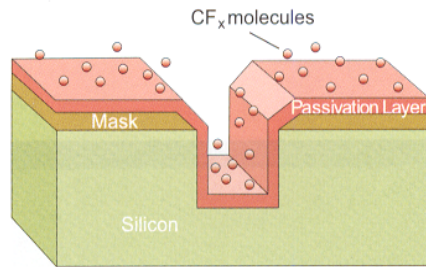
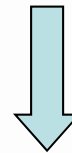


Figure 1. A dual source DRIE system.

# DRIE – Bosch Process



- Passziválás  
 $C_4F_8 \rightarrow n CF_2$  (PTFE)



- Marás  
 $SF_6 \rightarrow F + \text{ionok}$   
 ionbombázás + polimer marás (függőleges falak kivételével)



- $SF_6$  izotróp - enyhén anizotróp Si marás



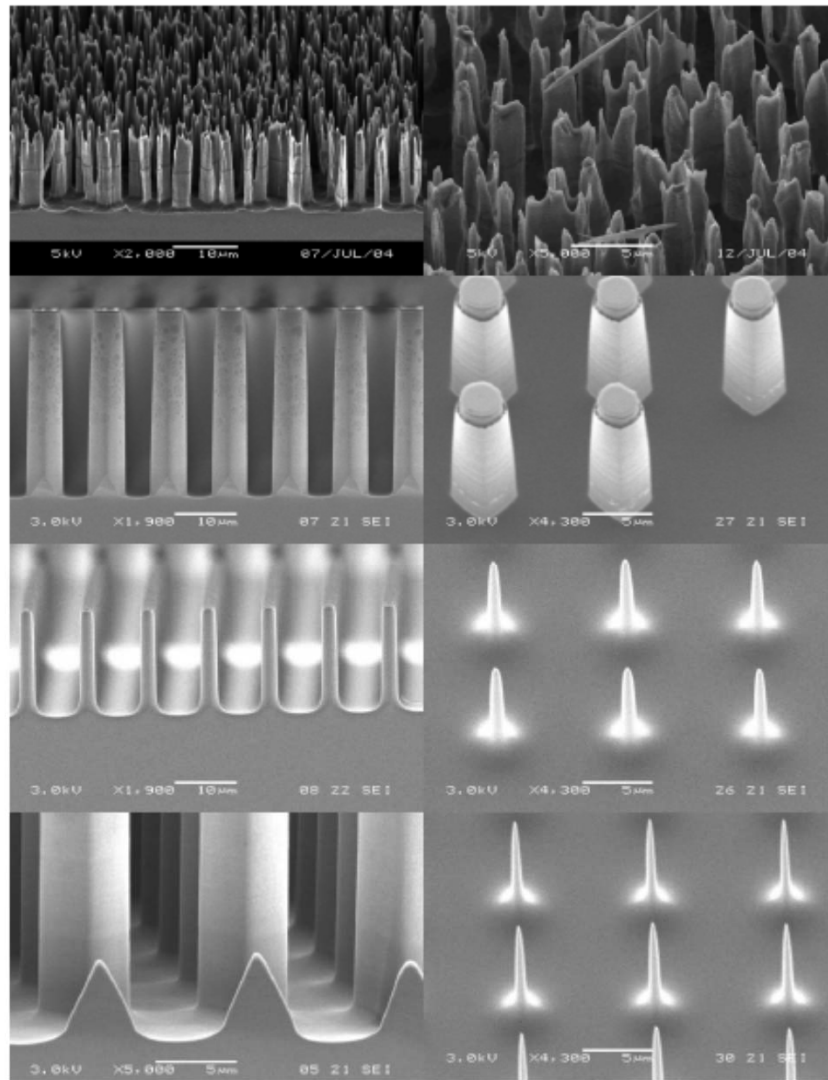


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

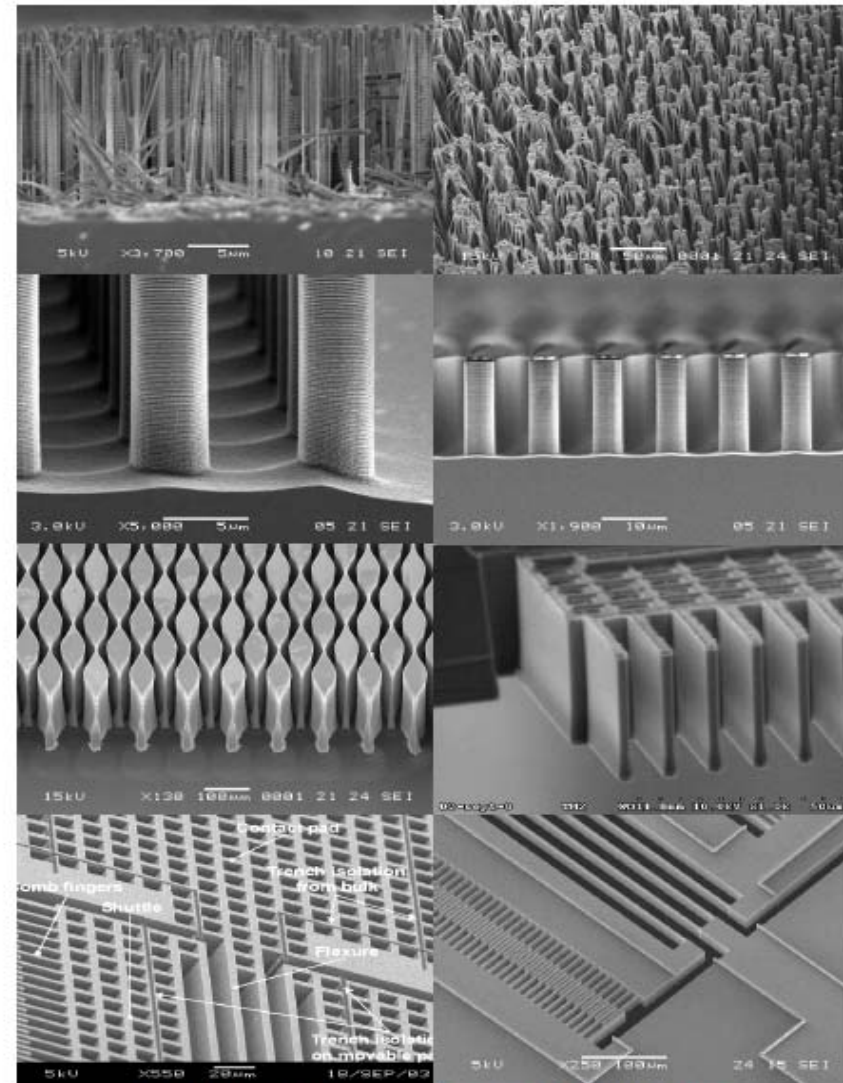


Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# SZELETKÖTÉS











MEMS • BIOMEMS • NEMS

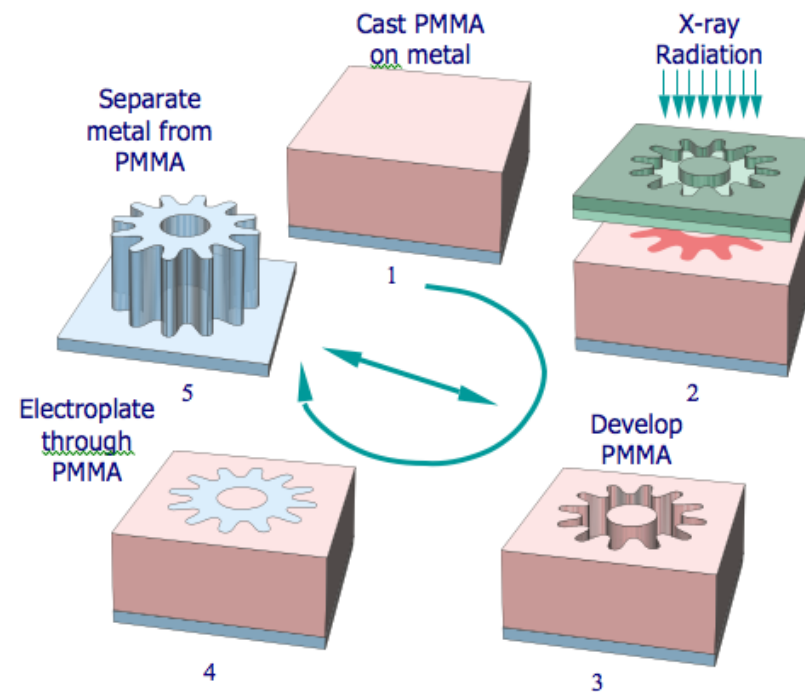
# LIGA



# LIGA (KIT)

## Lithographie, Galvanoformung, Abformung (Litográfia, Electroplating, Öntés)

- Nagy oldalarányú mikroszerkezetek kialakítása (100:1)
- Merőleges oldalfalak, 10nm felületi érdességgel (optikai elemek)
- Magasság: 10mikrontól néhány mm-ig
- X-ray LIGA (PMMA) / UV LIGA (SU-8)





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# SMART WORLD



# A MEMS ESZKÖZÖK TÖRTÉNETE

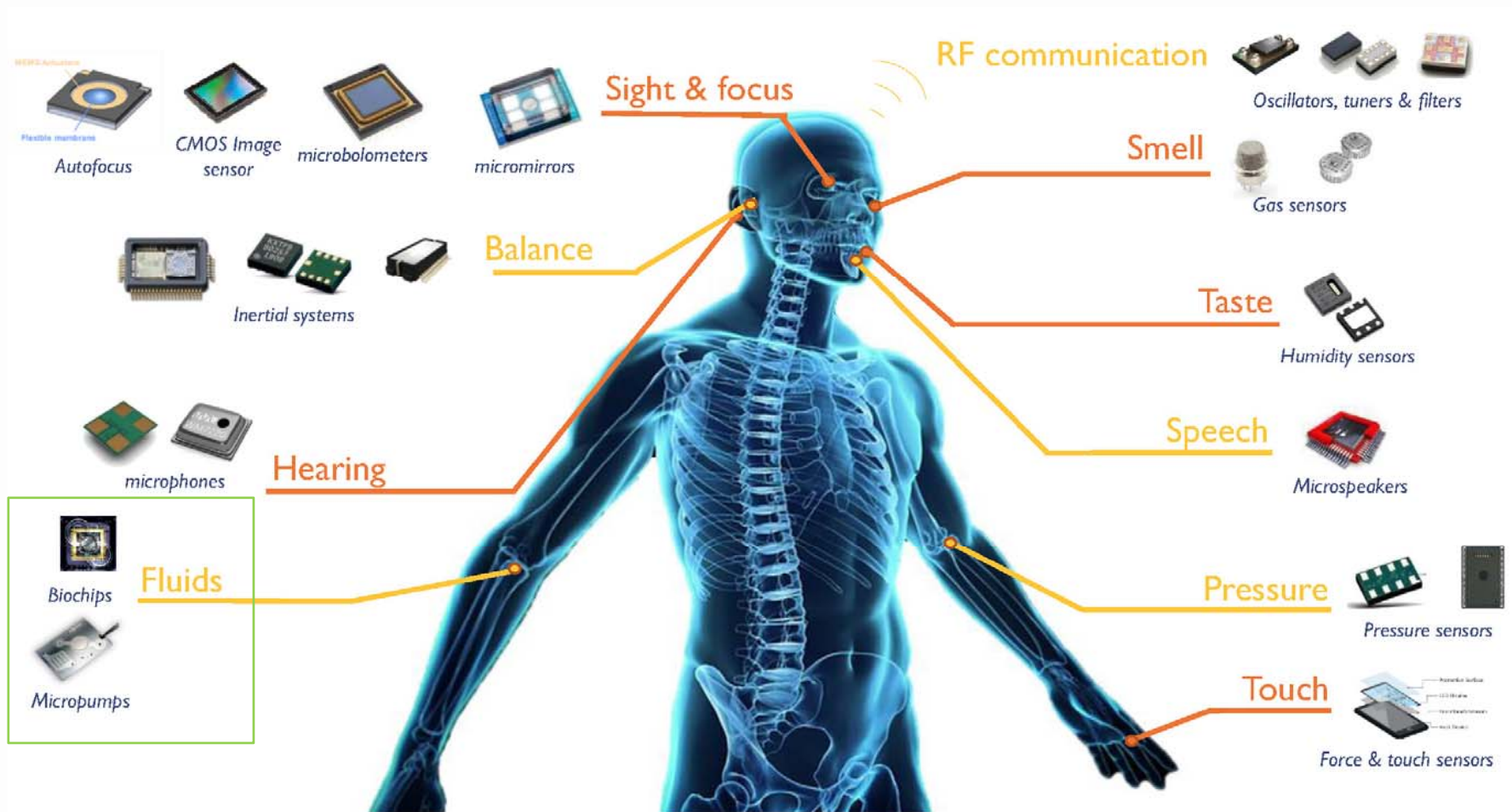
az autóipartól a kommunikációs elektronikáig



Steve Jobs  
APPLE



# HOGYAN UTÁNOZZUK az EMBERI ÉRZÉKELÉST?





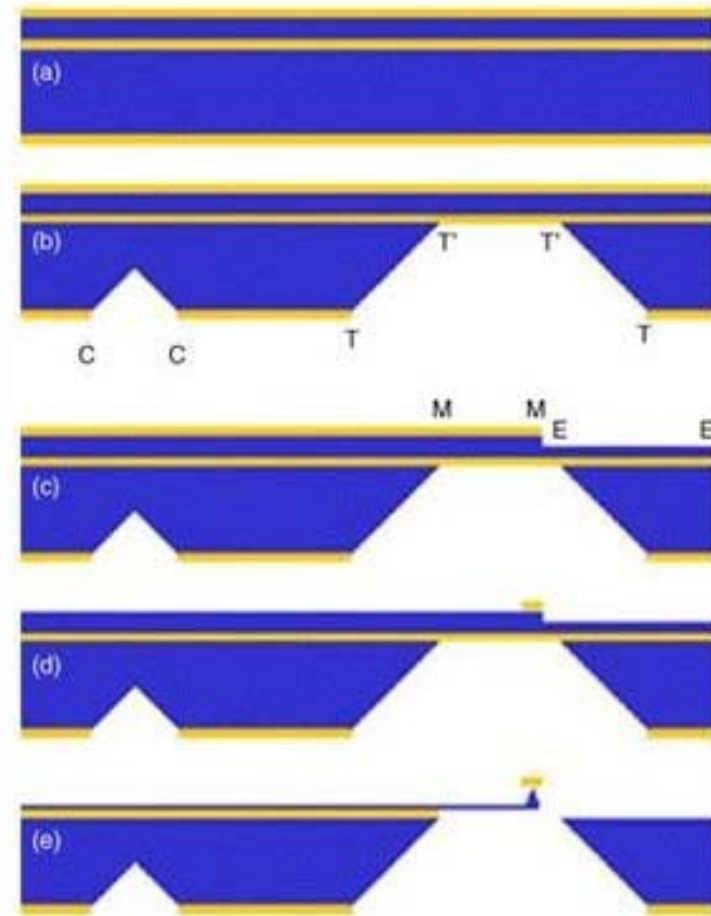
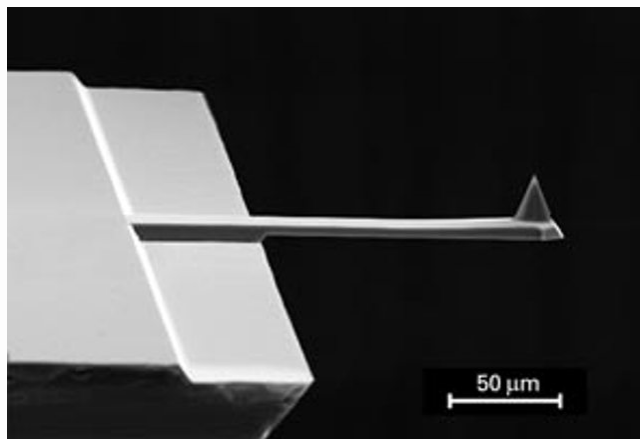
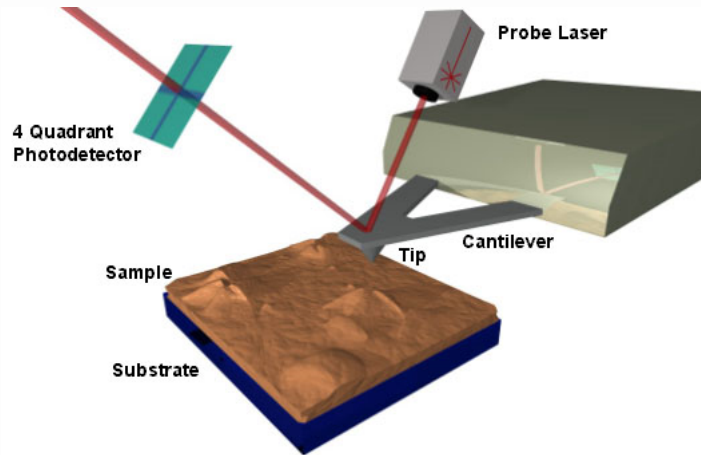


MEMS • BIOMEMS • NEMS

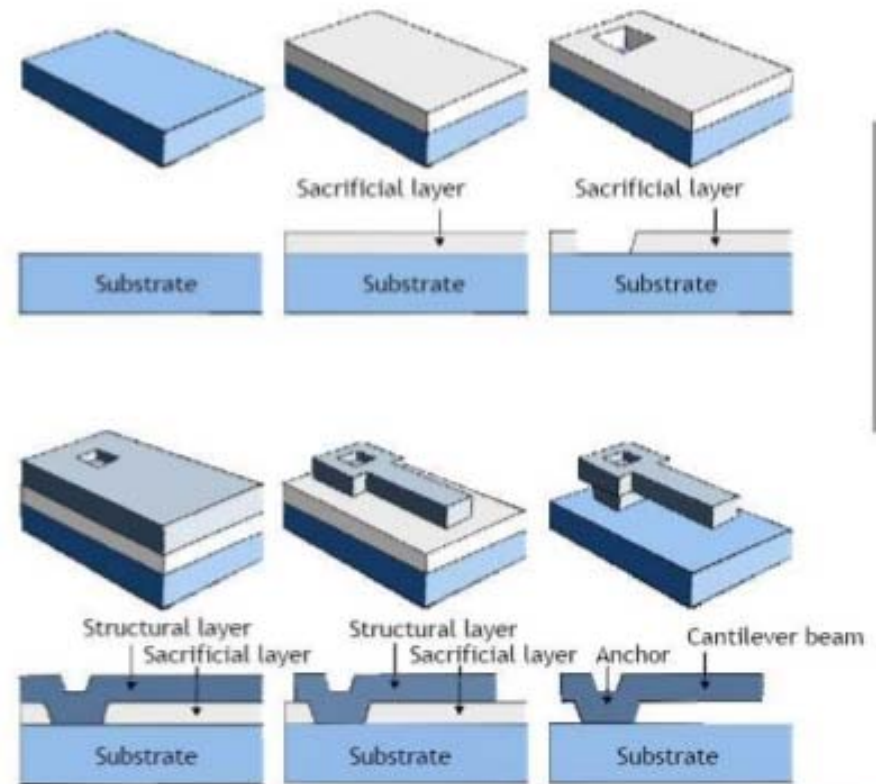
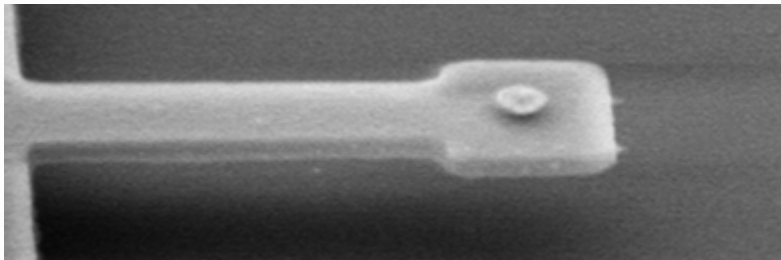
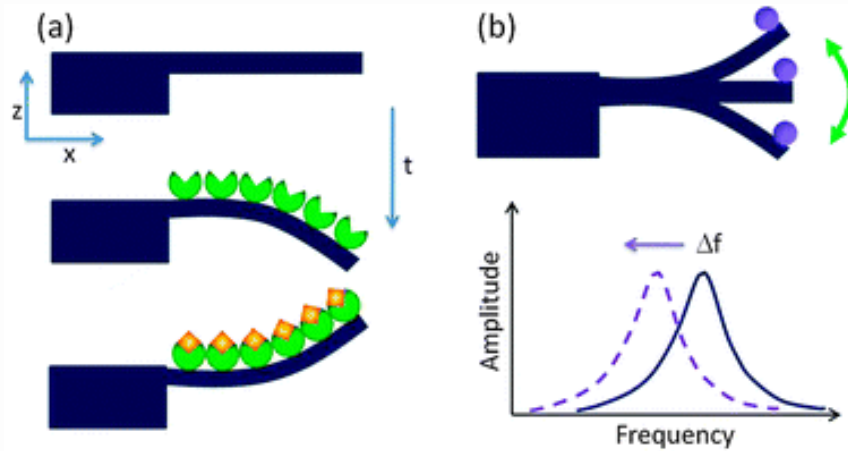
# ESZKÖZÖK



# KONZOL – TÖMBI MIKROMECHANIKA

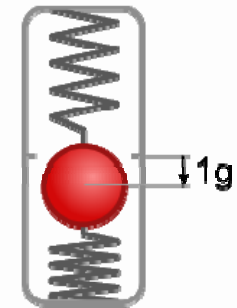
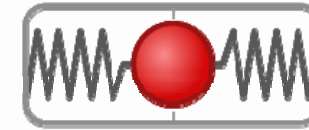


# KONZOL FELÜLETI MIKROMECHANIKA

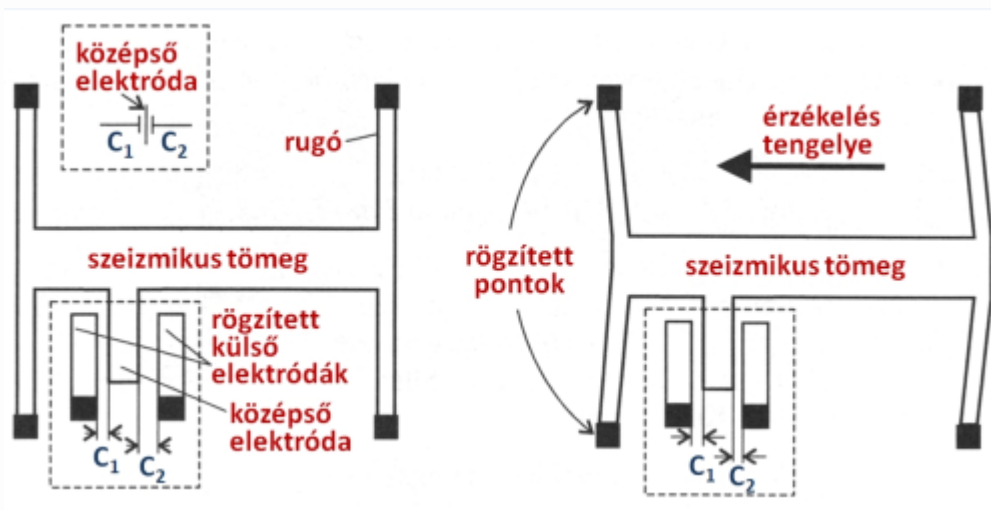


# GYORSULÁS - GIRO

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése



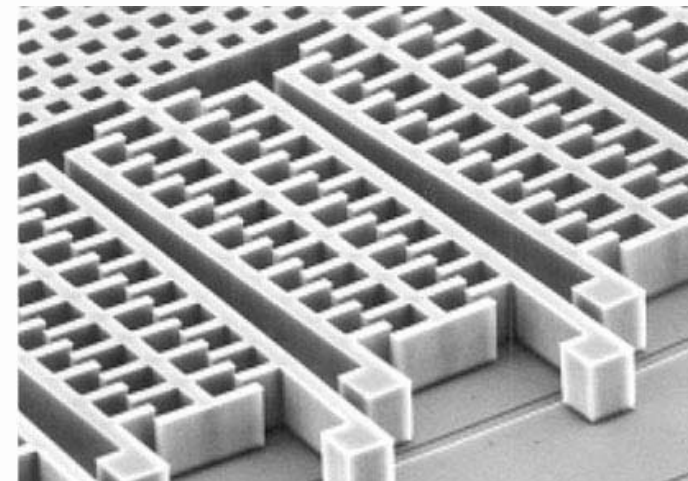
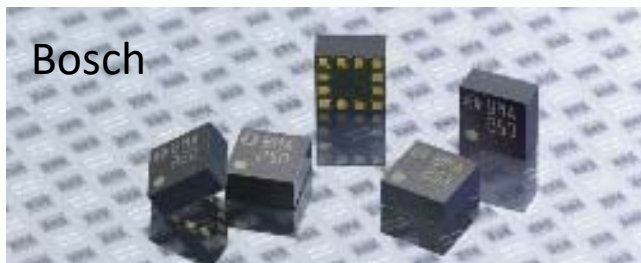
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



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

$$C_0 = \epsilon \frac{A}{d}$$

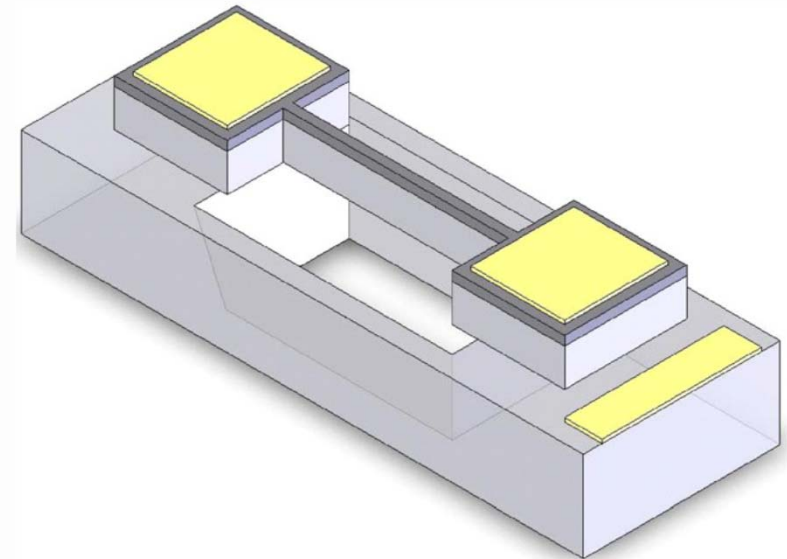
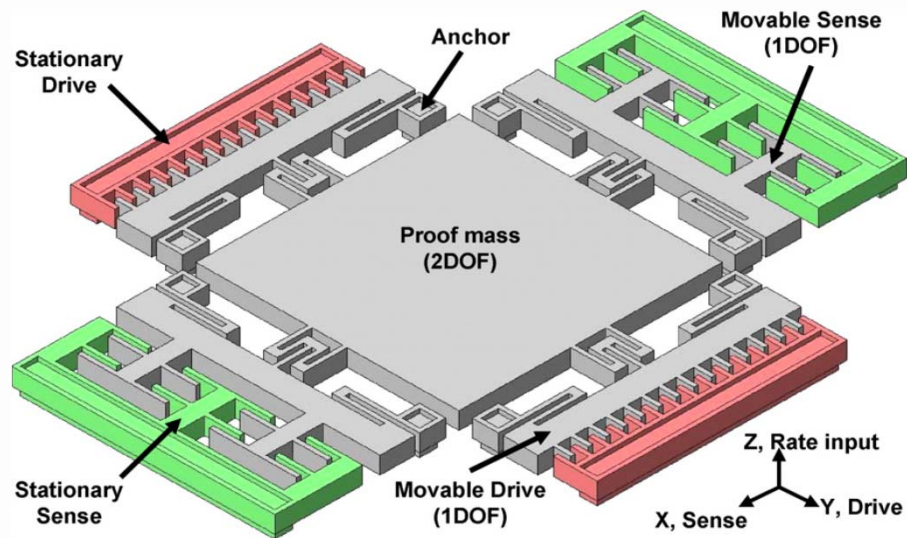
$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\epsilon \frac{A}{d^2}$$



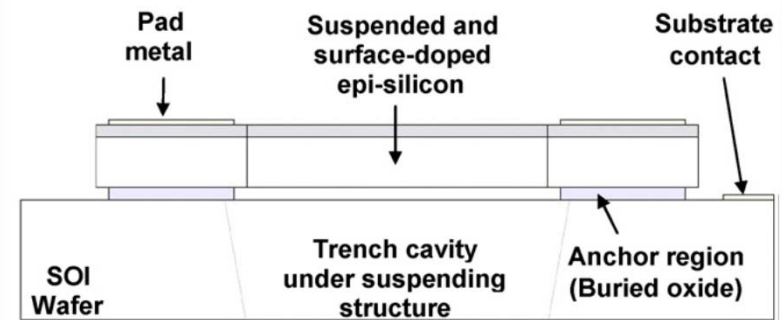
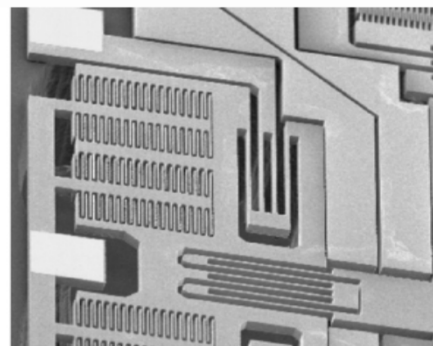
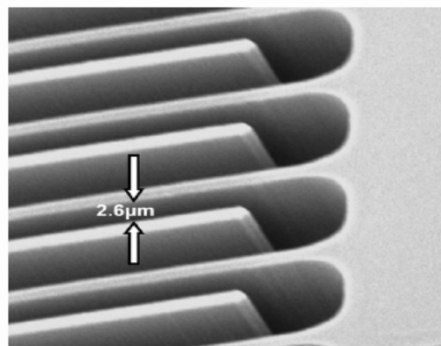


# GIRO – TÖMBI MIKROMECHNIKA

## SOI



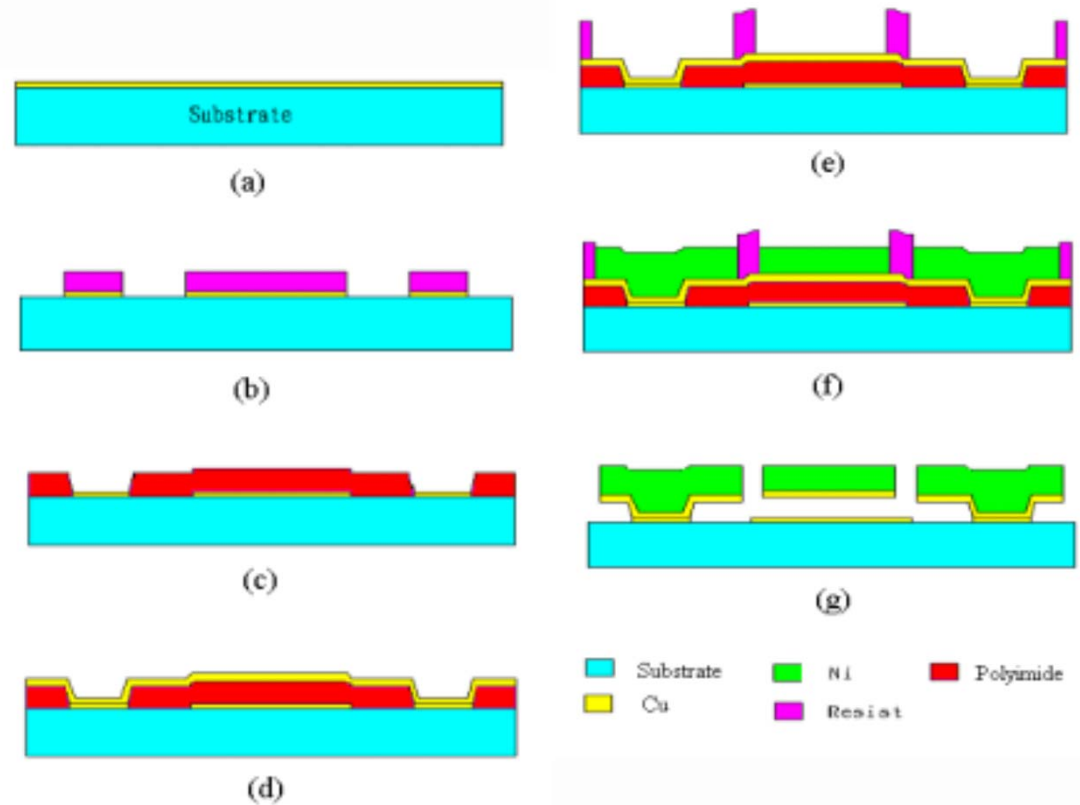
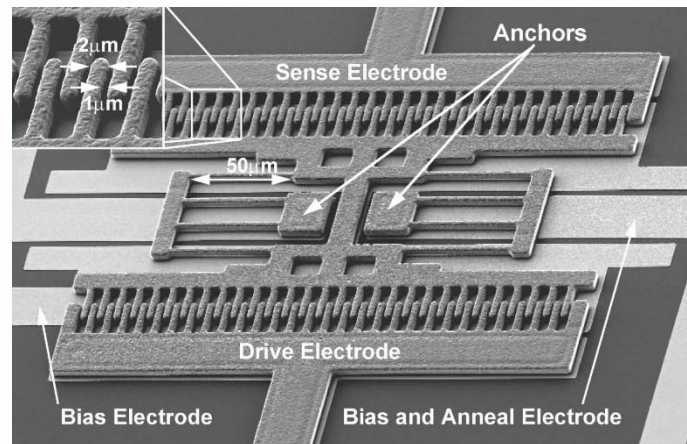
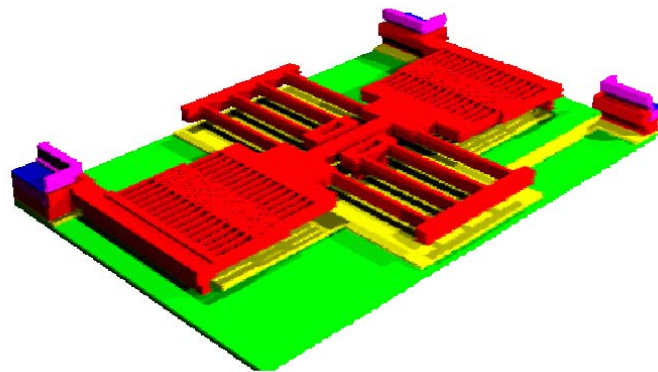
(a)



(b)

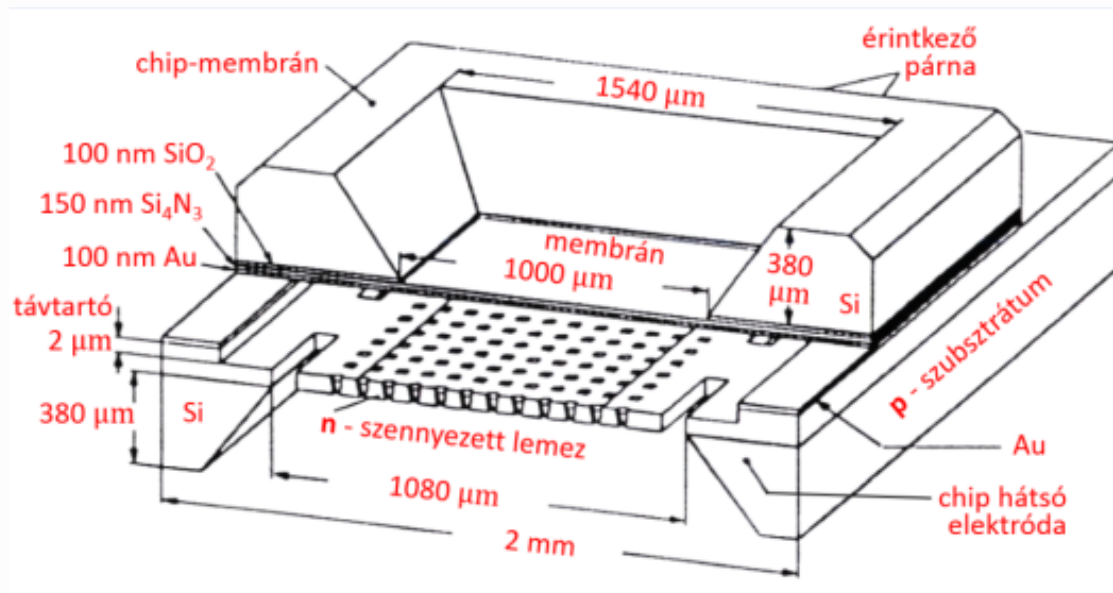


# COMB DRIVE – FELÜLETI MIKROMECHANIKA



# MIKROFON

## High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



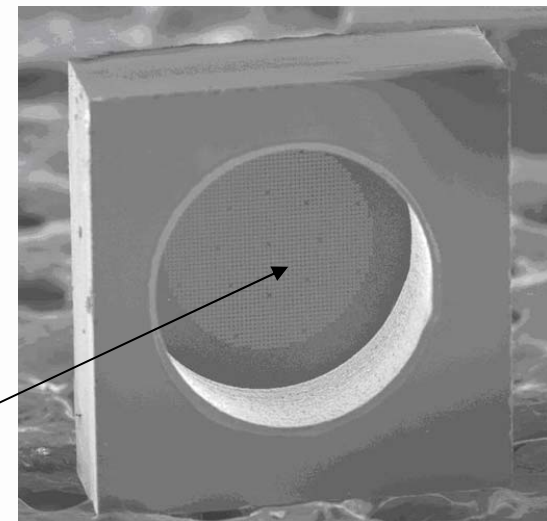
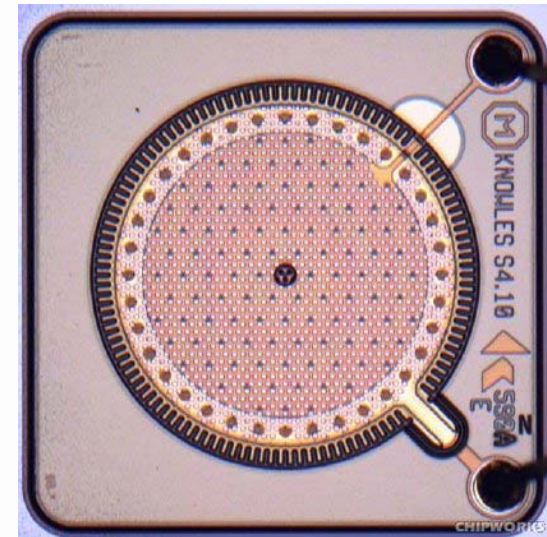
Felső elektróda: Au SiO<sub>2</sub> / SiN<sub>x</sub> membránon

Alsó elektróda: nSi

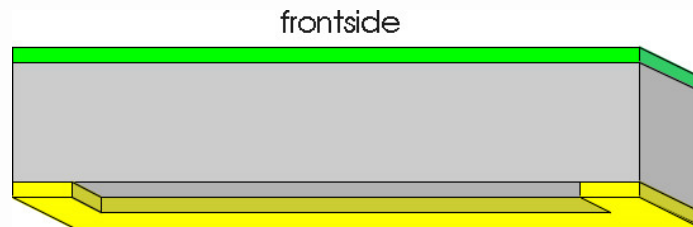
$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d}$$

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

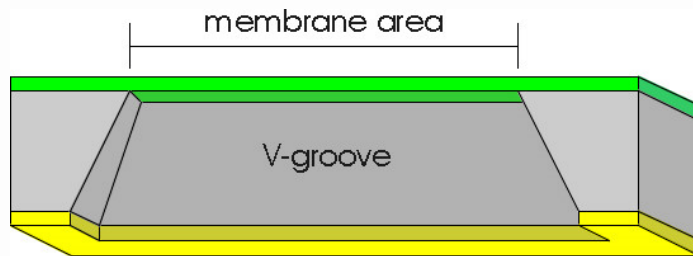
DRIE (mély reaktív ionmarással) mart membrán



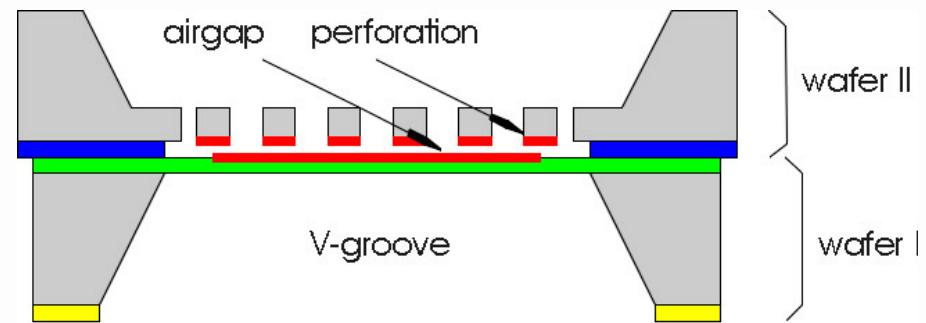
# MIKROFON – TÖMBI MIKROMECHANIKA - KOH



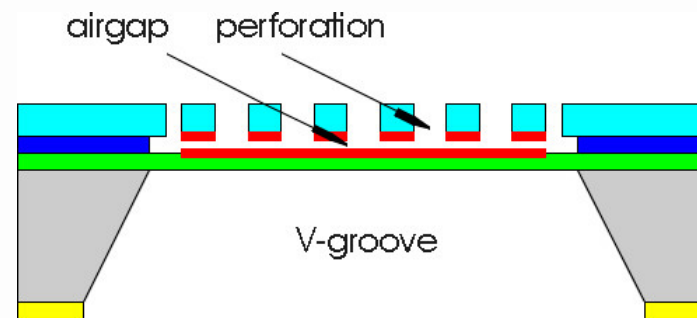
- backside
- membrane layer
  - Si-wafer
  - masking layer



- membrane area
- V-groove
- membrane layer
  - Si-wafer
  - masking layer



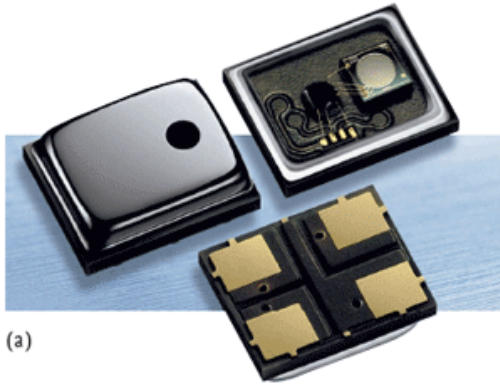
- membrane layer
- Si-wafer
- spacer
- masking layer
- electrodes



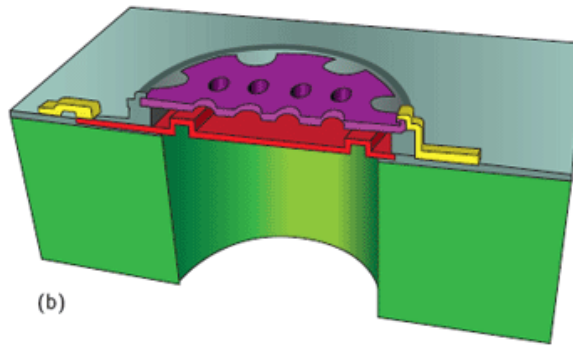
- membrane layer
- Si-wafer
- electrodes
- masking layer
- spacer
- rigid backplate



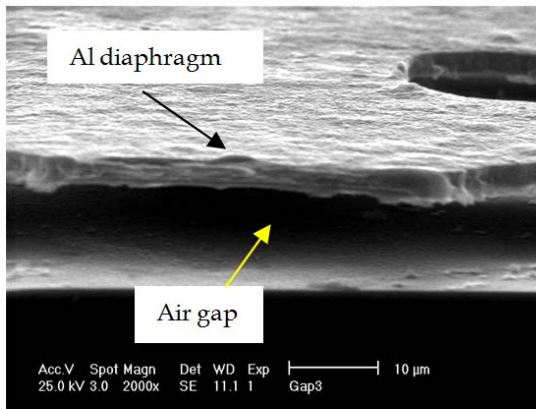
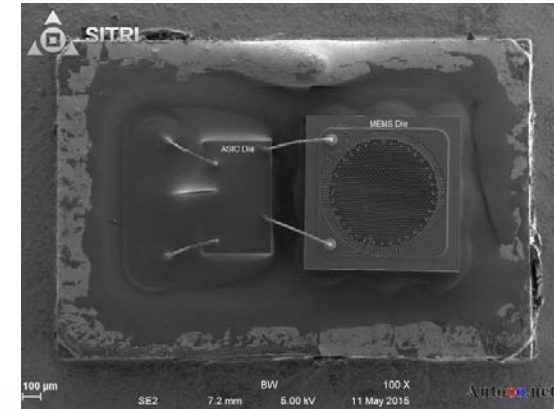
# MIKROFON - TÖMBI/FELÜLETI KOMBO



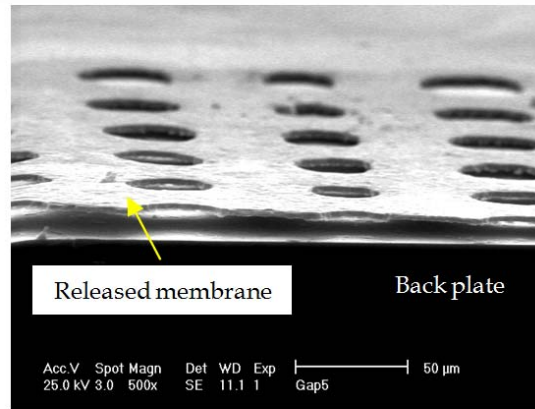
(a)



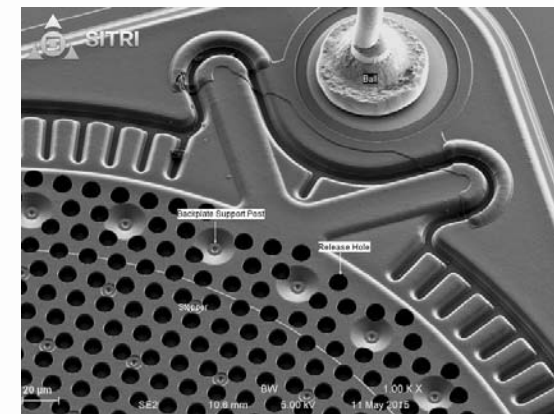
(b)



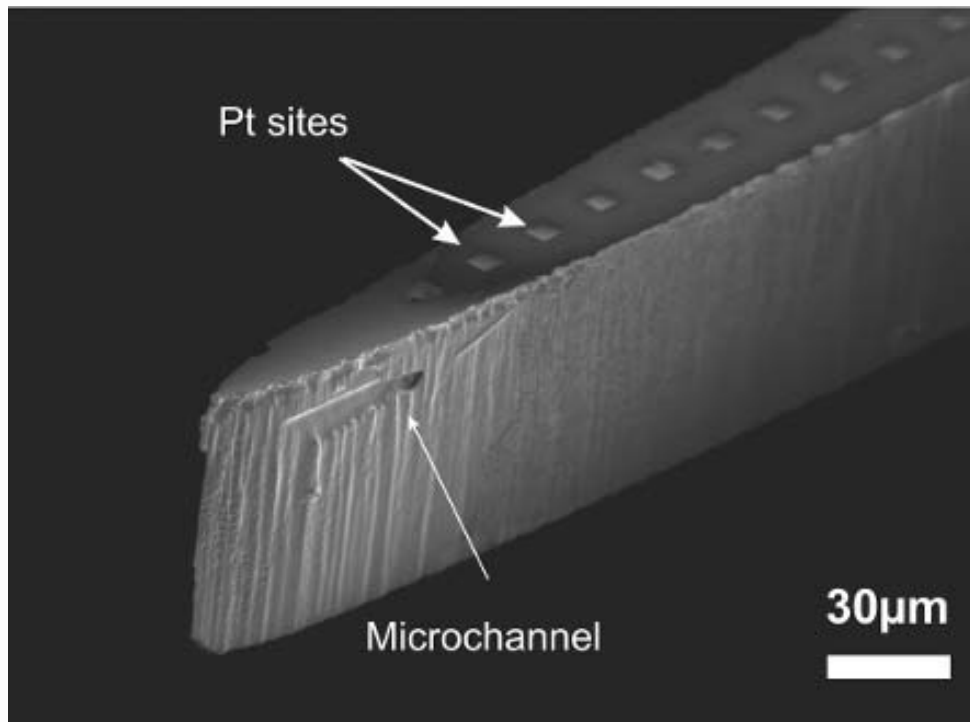
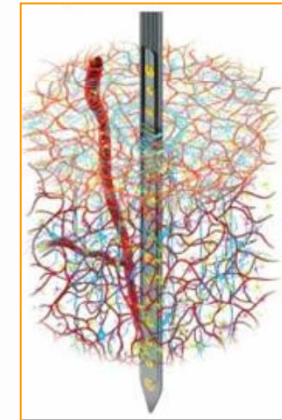
(a) Air gap of microphone



(b) Released membrane structure



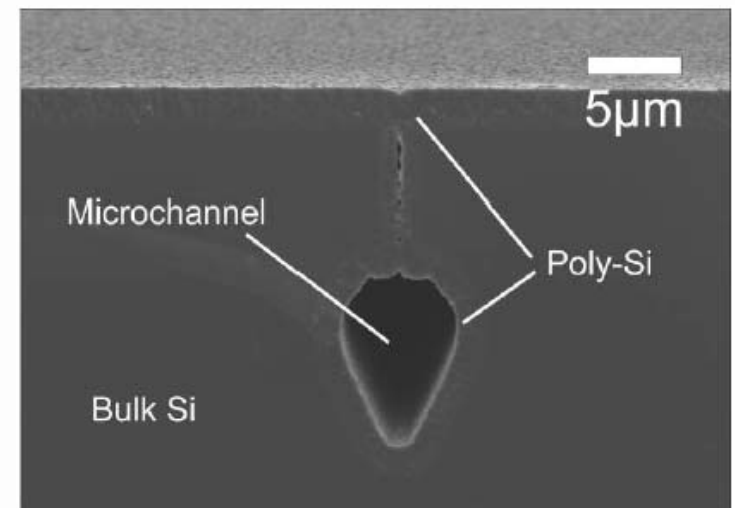
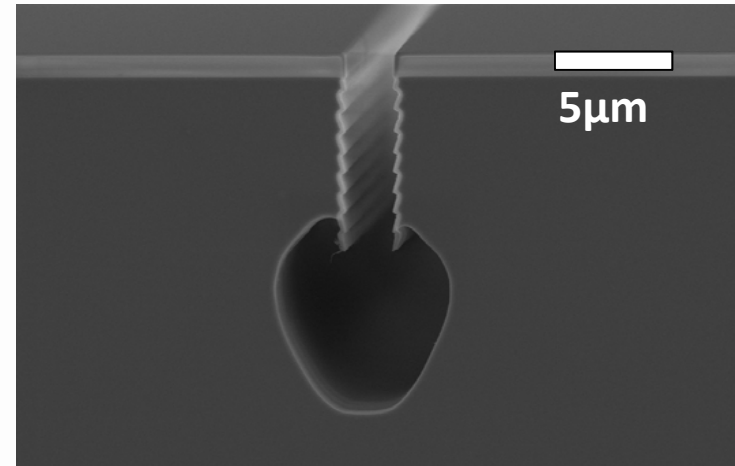
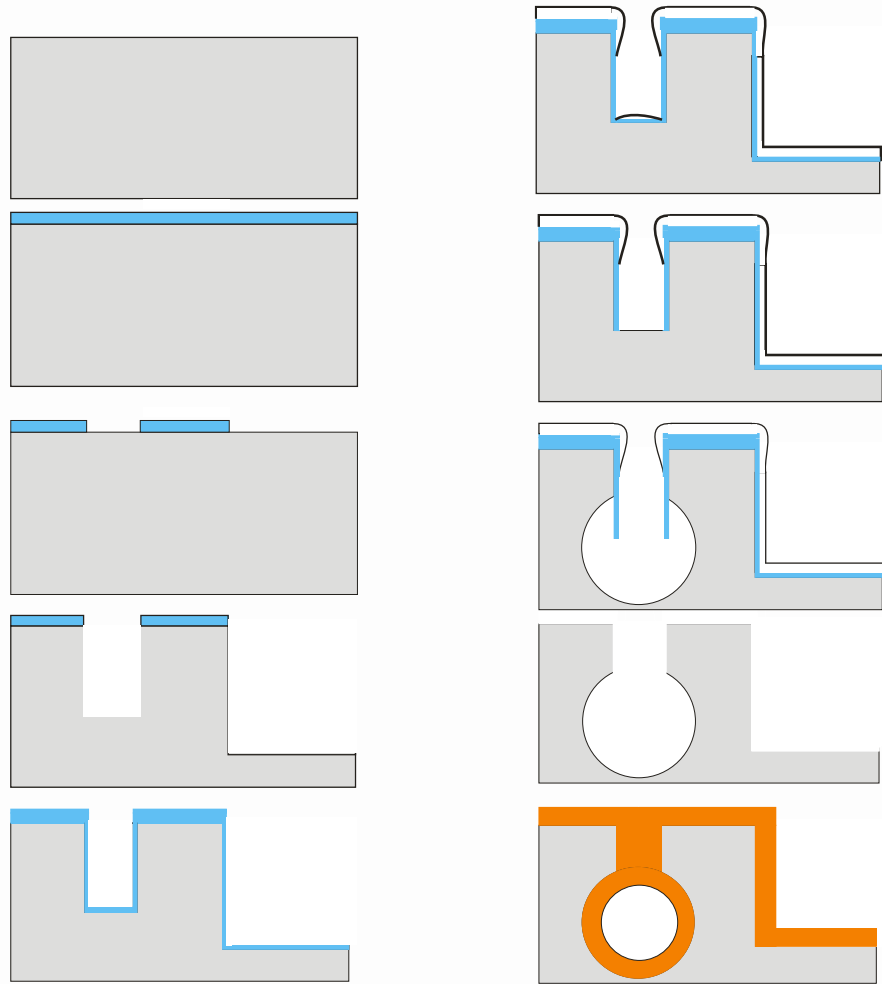
# GYÓGYSZERADAGOLÓ CSATORNA SZILÍCIUM NEURÁLIS ELEKTRÓDÁBAN



- Nagy átbocsájtó képességű csatorna hálózat egyetlen szubsztrátban
- Teljes tútest keresztmetszet kihasználása
- Orientációtól független pozícionálhatóság
- CMOS kompatibilis gyárthatóság
- További litográfiára alkalmas felület



# ELTEMETETT MIKROCSATORNA TECHNOLÓGIÁJA





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# MESTRESÉGES TAPINTÁS



# MESTERSÉGES TAPINTÁS

## BIOMIMETIKUS ERŐÉRZÉKELÉS

### A tapintás analógiája

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

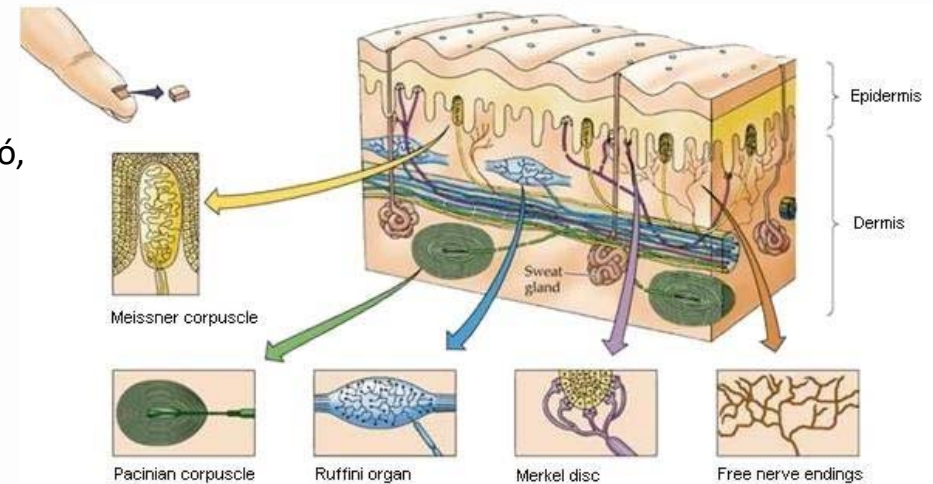


Review

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

### Humán tapintó receptorok



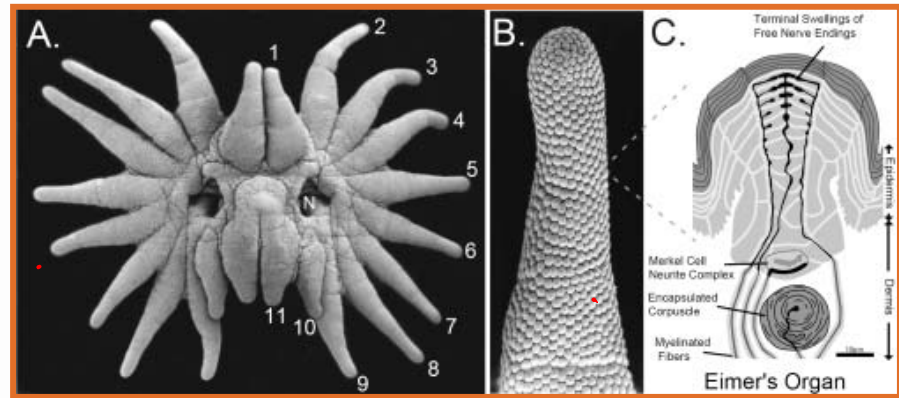
Type	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacini
Number	25%	19%	43%	13%
Adaptivity	Slow	Slow	Fast	Fast
Receptor type	SAI	SAII	FAI	FAII
Field diameter	3–4 mm	>10 mm	3–4 mm	>20 mm
Frequency range	0–30 Hz	0–15 Hz	10–60 Hz	50–1000 Hz
Response to indentation $S(t)$	$S, \frac{ds}{dt}$	$S$	$\frac{ds}{dt}$	$\frac{d^2s}{dt^2}$
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 ...



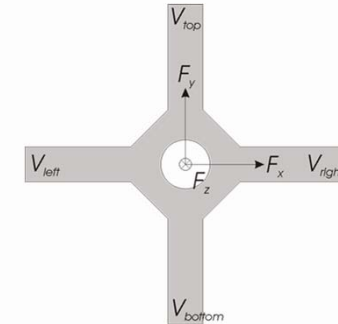
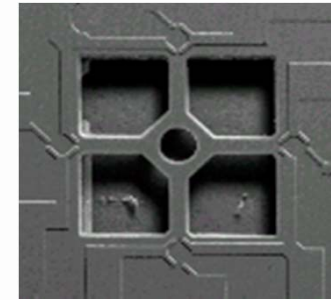
Csillagorrú vakond:  
tapintó szem – Eimer szerv





# 3D PIEZOREZISZTÍV ERŐMÉRŐ

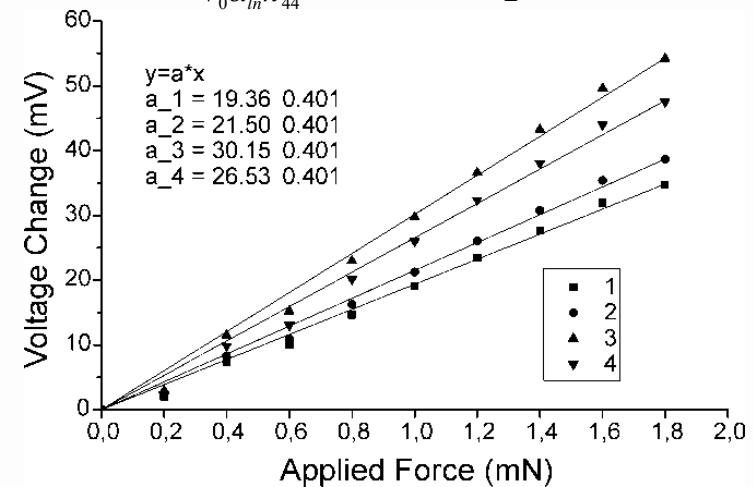
- Egyoldalas Si mikromechanikai megmunkálás
- Piezorezisztív érzékelés
- Lineáris elmélet: a felületi erők és a mért feszültségek között egyszerű összefüggés
- A három erőkomponens egymástól függetlenül mérhető
- Minden érzékelő erővektort (nagyság + irány) mér!
- Érzékenység: 20-30 mV/mN (5V)



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

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

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





# 3D PIEZOREZISZTÍV ERŐMÉRŐ

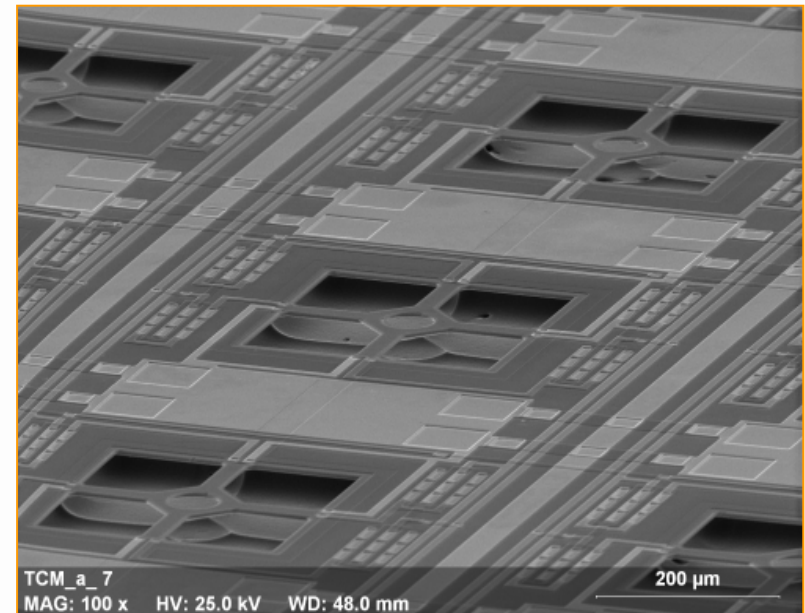
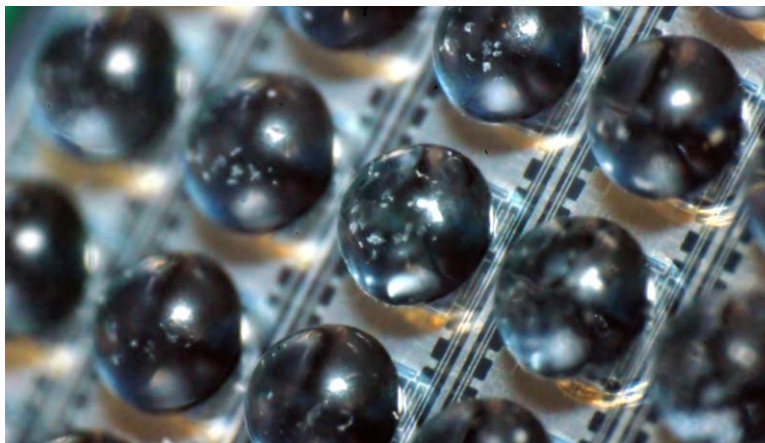
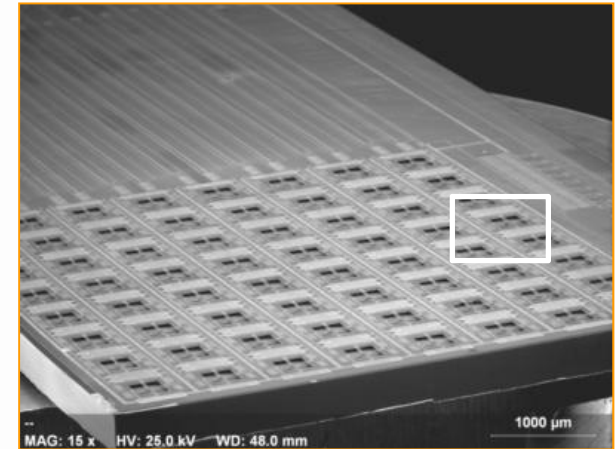
3D erőterkép 2D felületen

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





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# INTRO EK - MFA





MEMS • BIOMEMS • NEMS

# INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – INTEL



MEMS • BIOMEMS • NEMS

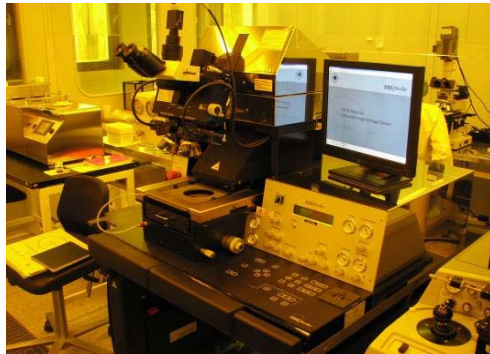


Microsystems Laboratory • Institute of Technical Physics and Material Sciences • Centre for Energy Research  
Mikrorendszerek Laboratórium • Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet • Energiatudományi Kutatóközpont

MEMS.HU  
BIOMEMS.HU



# INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – EK MFA



## **MEMS labor:**

300+150 m<sup>2</sup> 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

(párolgatás, 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, Canon FIB nanoprocessing system**

SEM és fókuszált ionnyaláb (FIB),

Gáz injektáló rendszer (GIS) (EBAD, IBAD)

és Energia Diszperzív Spektroszkóp (EDS)