

Mikromechanikai technológiák



Fürjes Péter

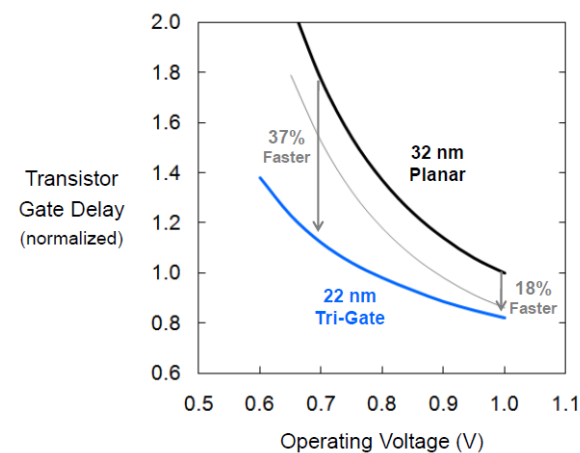
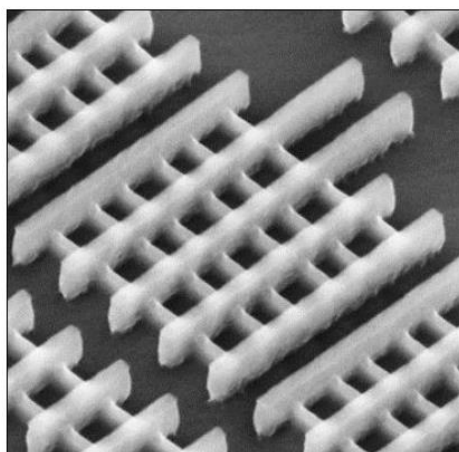
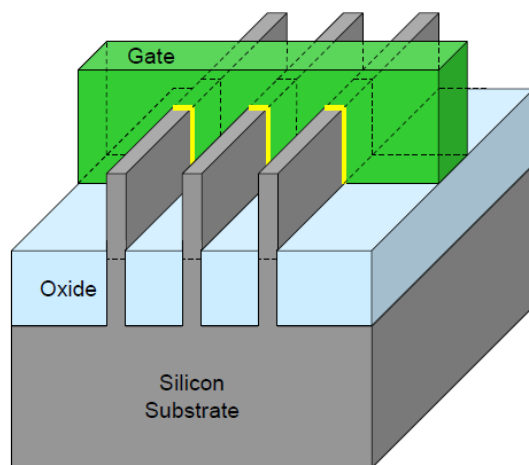
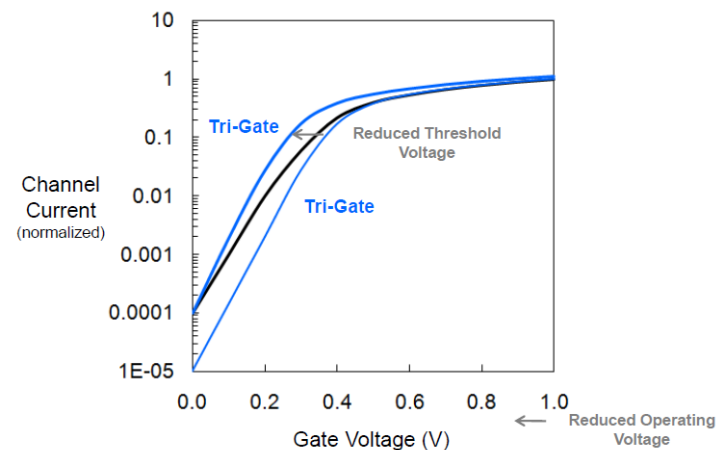
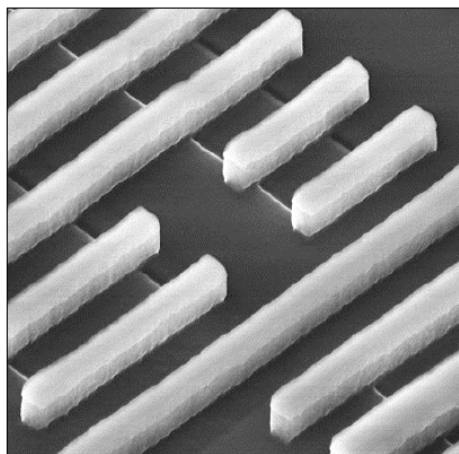
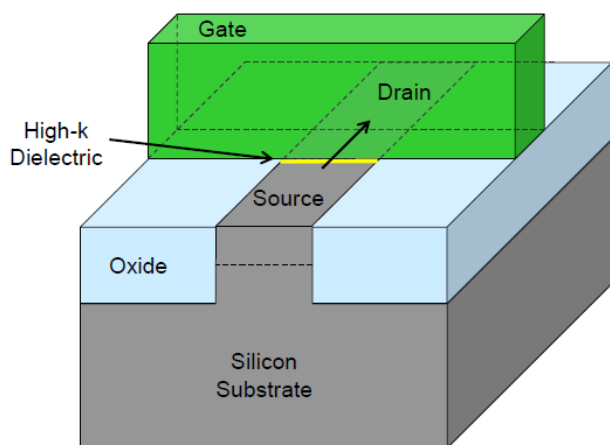
E-mail: furjes@mfa.kfki.hu, www.mems.hu

Ismétlés

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

TECHNOLÓGIA: a homoktól a processzorig

PLANÁR vs. 3D TRANZISZTOR



TECHNOLÓGIA: a homoktól a processzorig (3D TRI-GATE MOS)



MIKROMECHANIKA

Mikromechanika

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

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

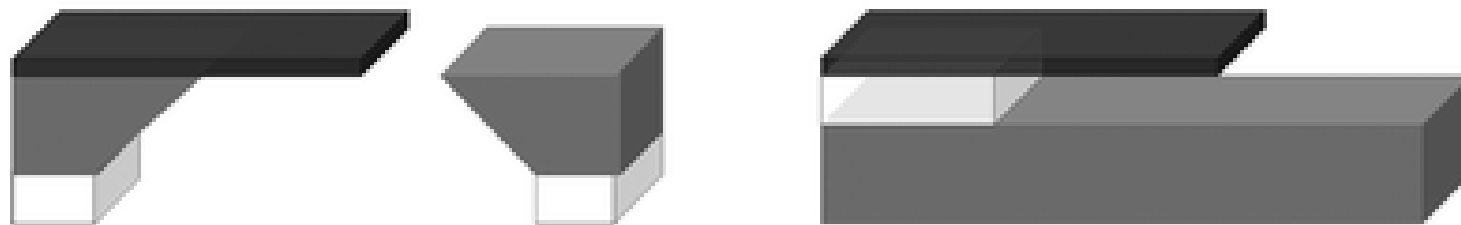
Mikromegmunkálás:

- 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 μm

Si kristály vastagsága 380-500-1000 μm

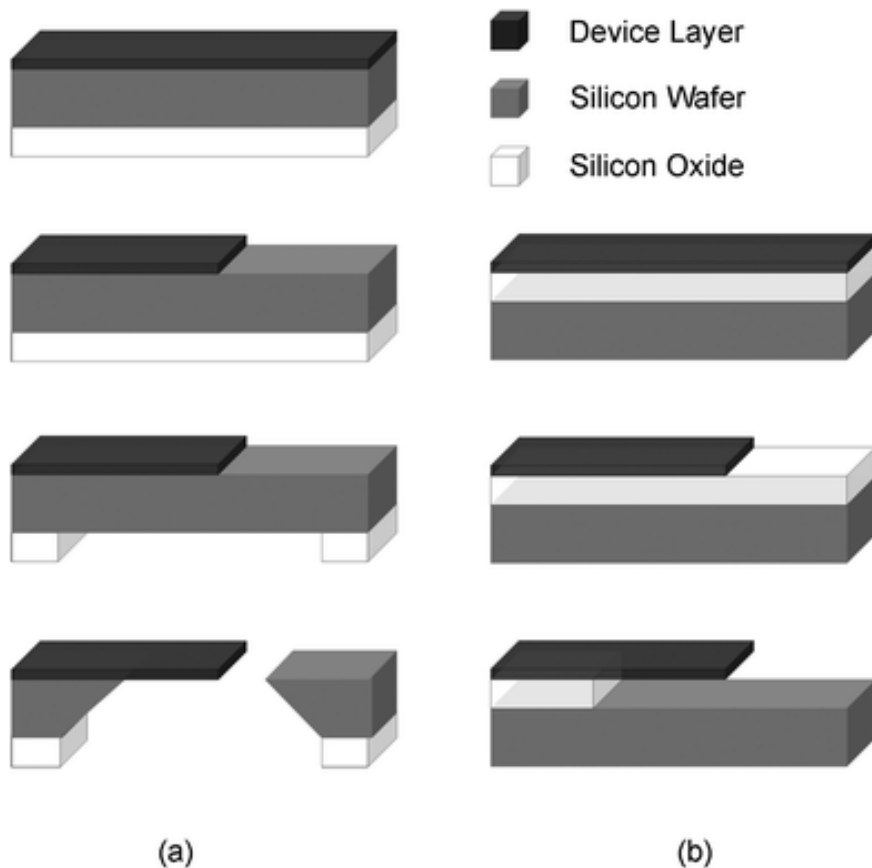
Tömbi vs. felületi mikromechanika



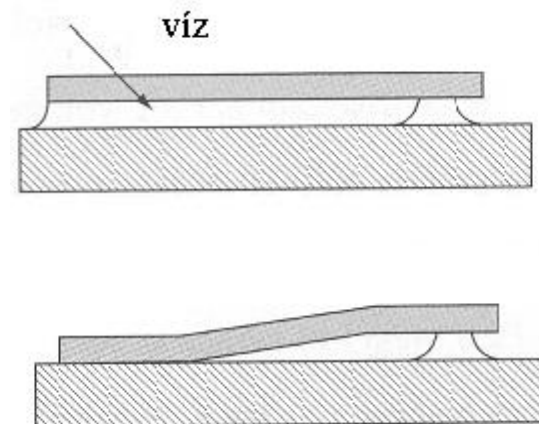
	Tömbi	Felületi
<i>Mérettartományok</i>	$2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$	$a < 2-3 \mu\text{m}$
<i>Termikus szigetelés</i>	+	-
<i>Mechanikai stabilitás</i>	+	-
<i>Membránok?</i>	egykristály	amorf v. polikristályos

harmadik lehetőség: Egykristályos anyagból a felületi mikromechanikára jellemző mérettartományok : Pl. "Smart Cut"

Tömbi vs. felületi mikromechanika

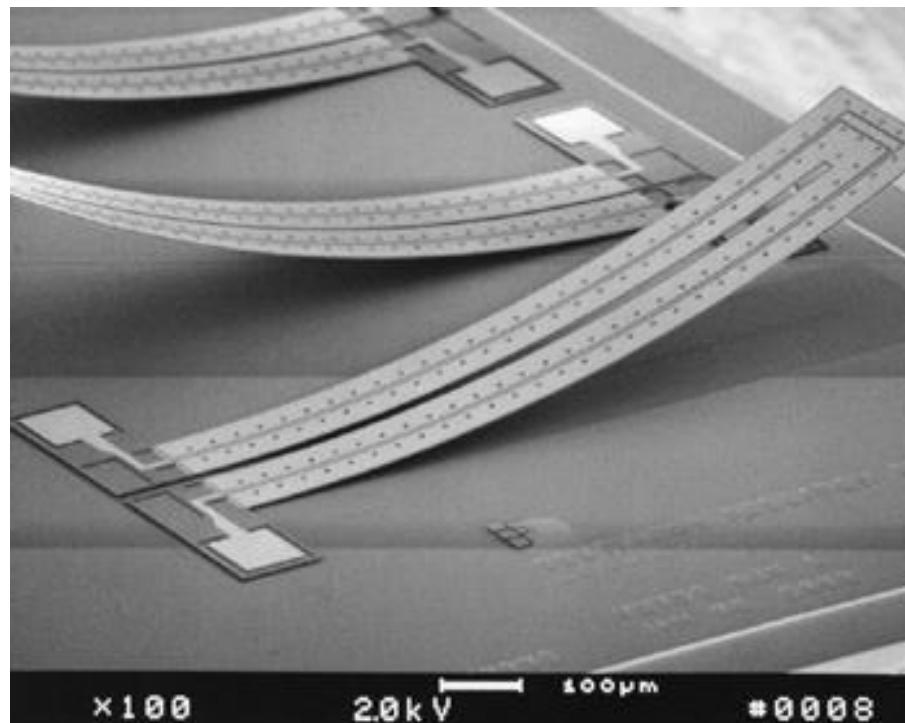
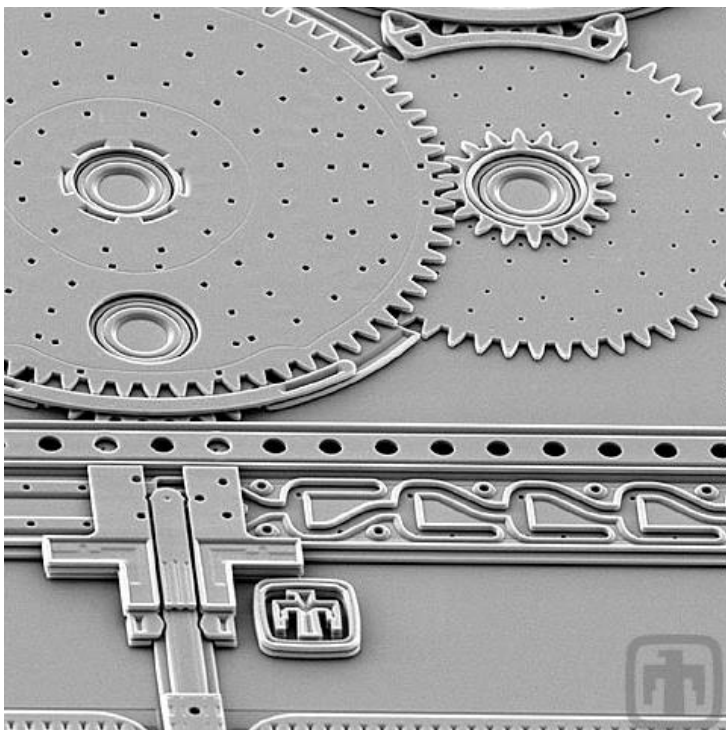


Jellegzetes hiba: letapadás

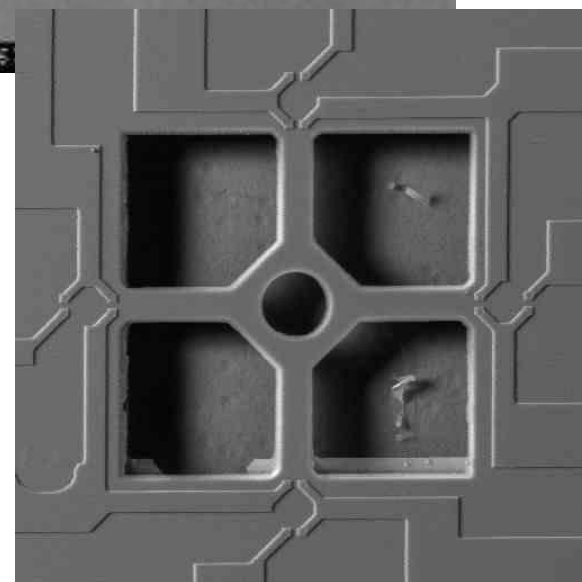
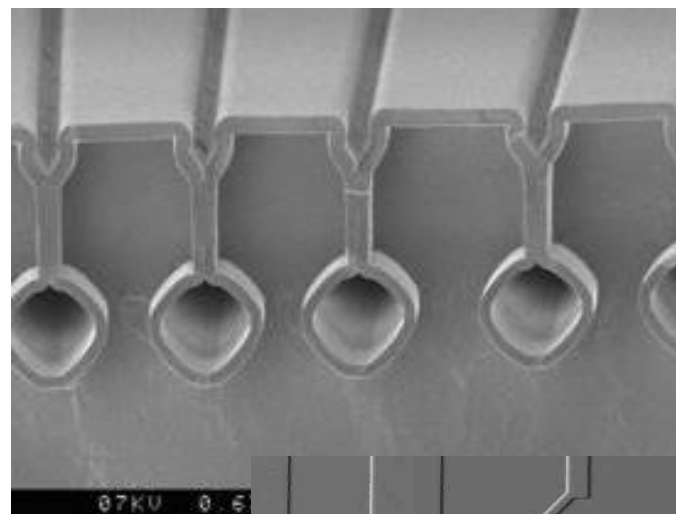
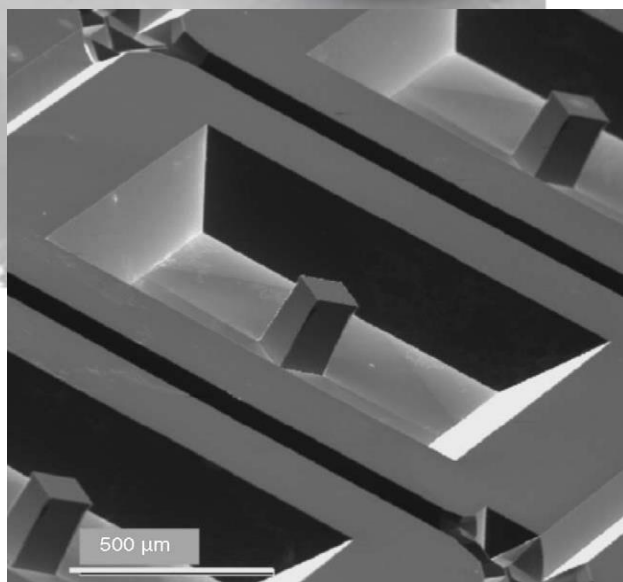
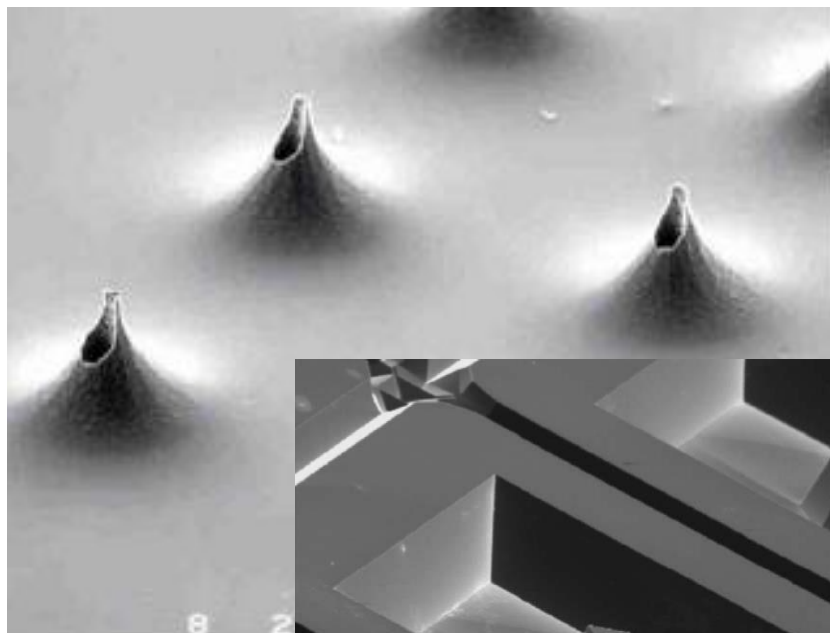


Megoldás:
beépített ütköző
vagy perforált alakzatok
vagy száraz marások

Példák felületi mikromechanikára

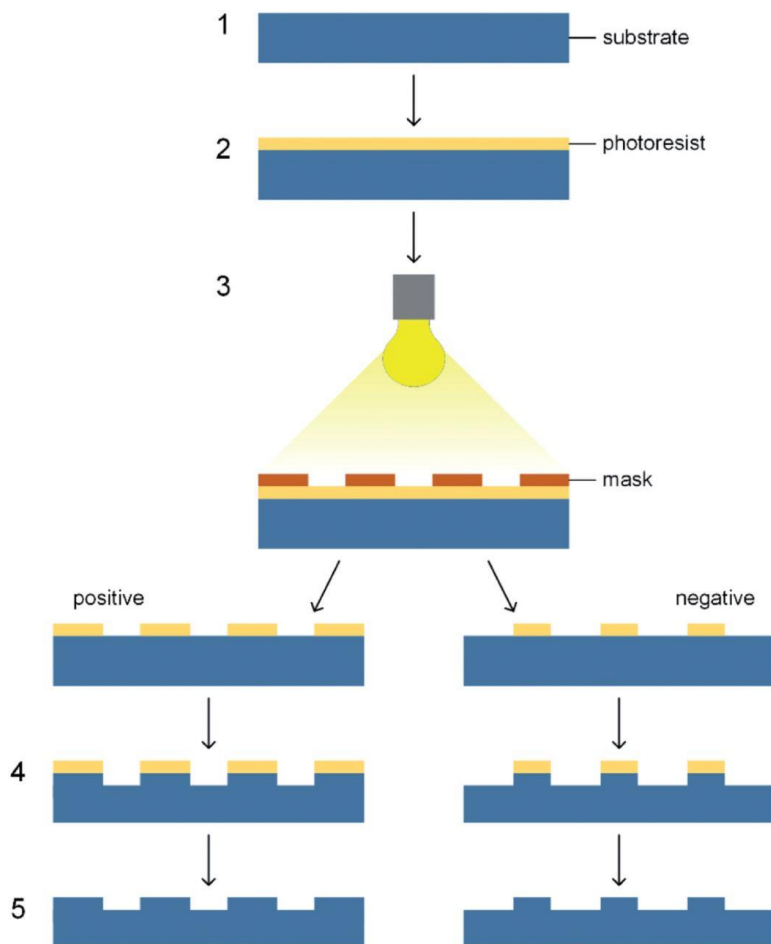


Tömbi mikromechanika



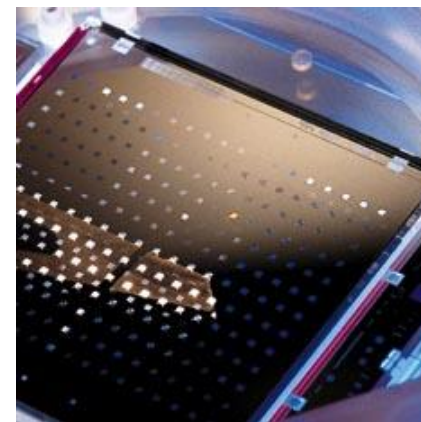
LITOGRÁFIA

FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



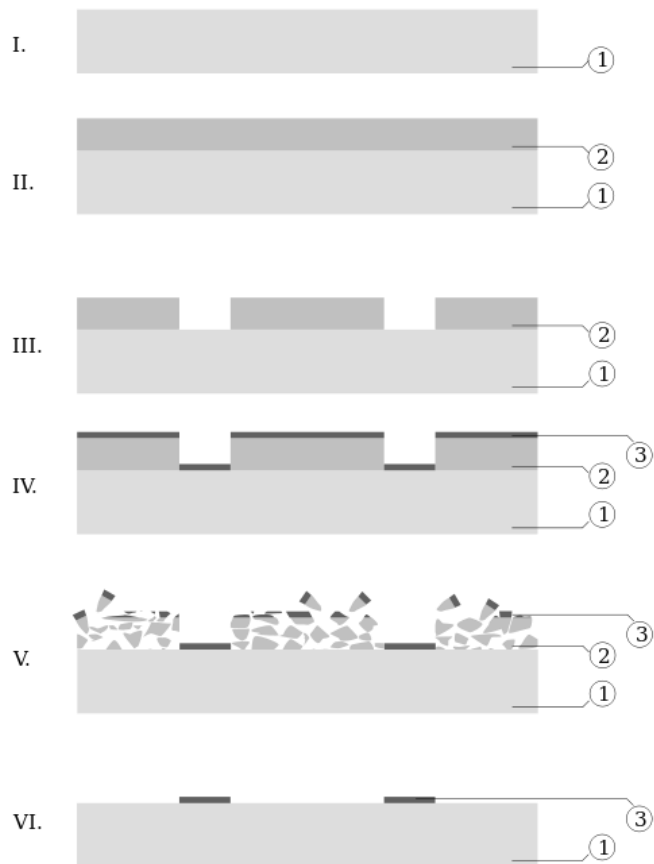
1. Megmunkálandó felület előkészítése
2. Lakkfelvitel / lakkszáritás
3. Exponálás / előhívás

Exponálást követő
hőkezelés /
keményítés



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

FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR – LIFT-OFF



1. Megmunkálendő felület előkészítése

2. Lakkfelvitel / lakkszáritás

3. Exponálás / előhívás

Exponálást követő hőkezelés

4. Rétegleválasztás

5. Lakkeltávolítás, tisztítás

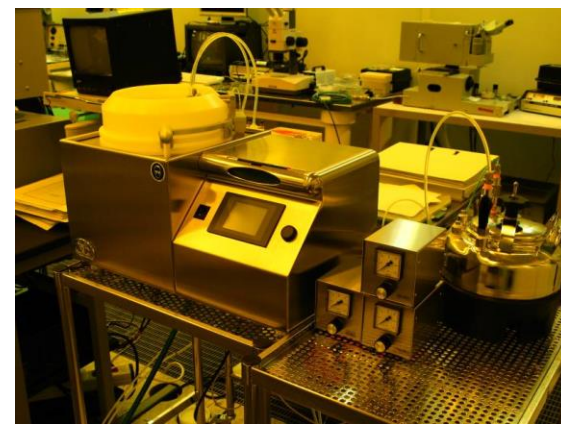
FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



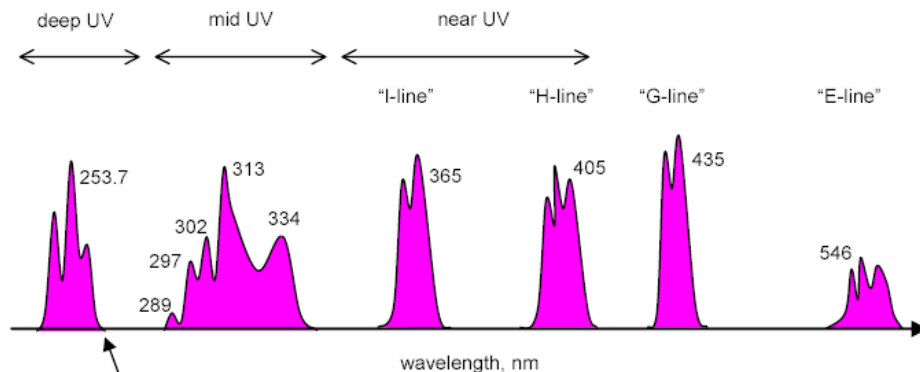
Lakkcentrifuga – hotplate



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

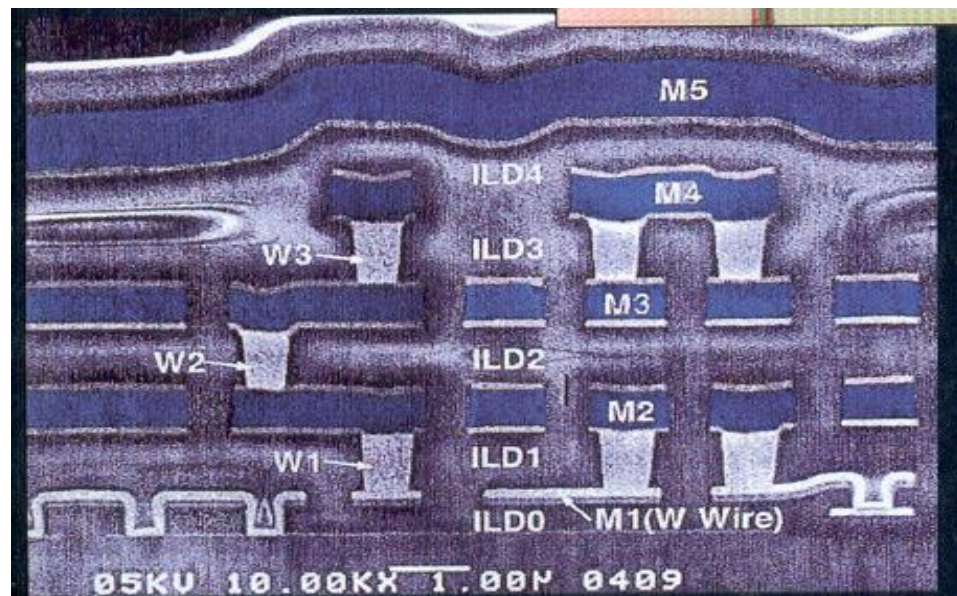
RÉTEGLELVÁLASZTÁS

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, B₄C, 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...)

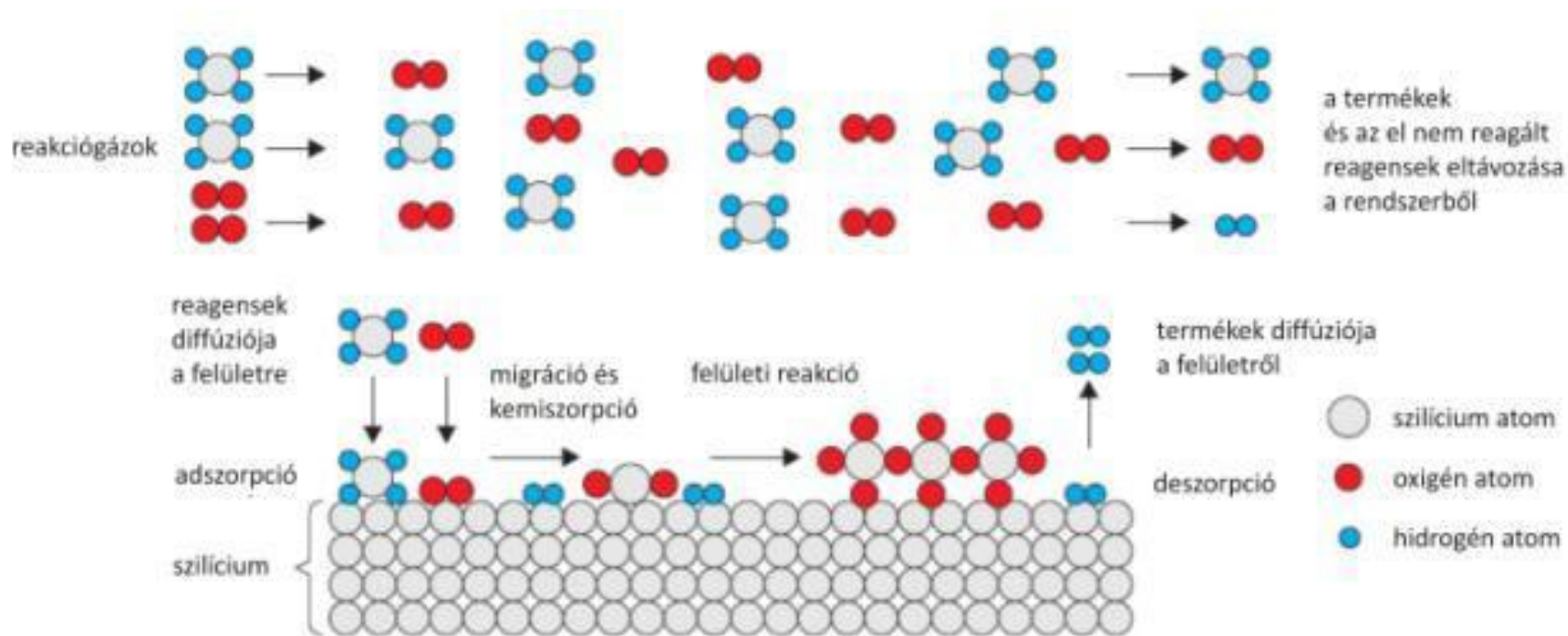
MWCVD (MicroWave...)

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

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

CVD – Kémiai gőzfázisú leválasztás

- egy vagy több gázhalmazállapotú reagens (prekurzor) kémiai reakciója a szilárd szubsztráton
- felületkatalizált reakció
- szilárd termék

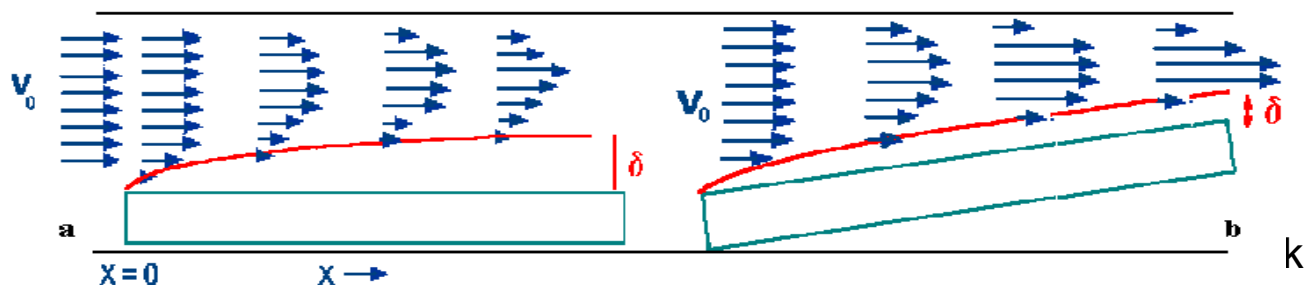


Atmoszférikus CVD - APCVD

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

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

μ kinematikai
viszkozitás
 ρ a sűrűség

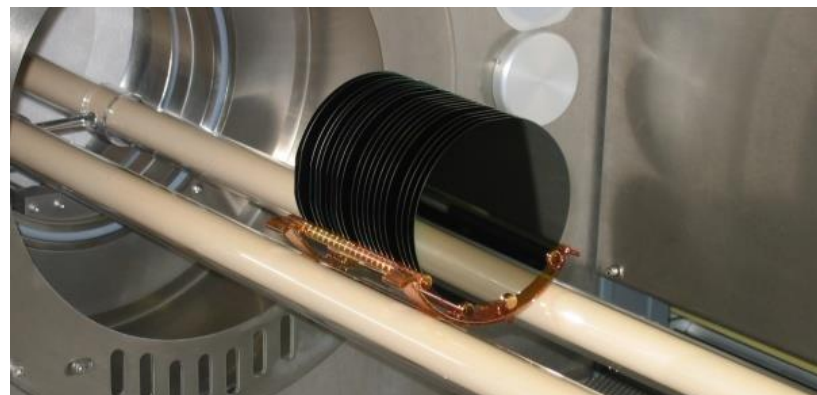
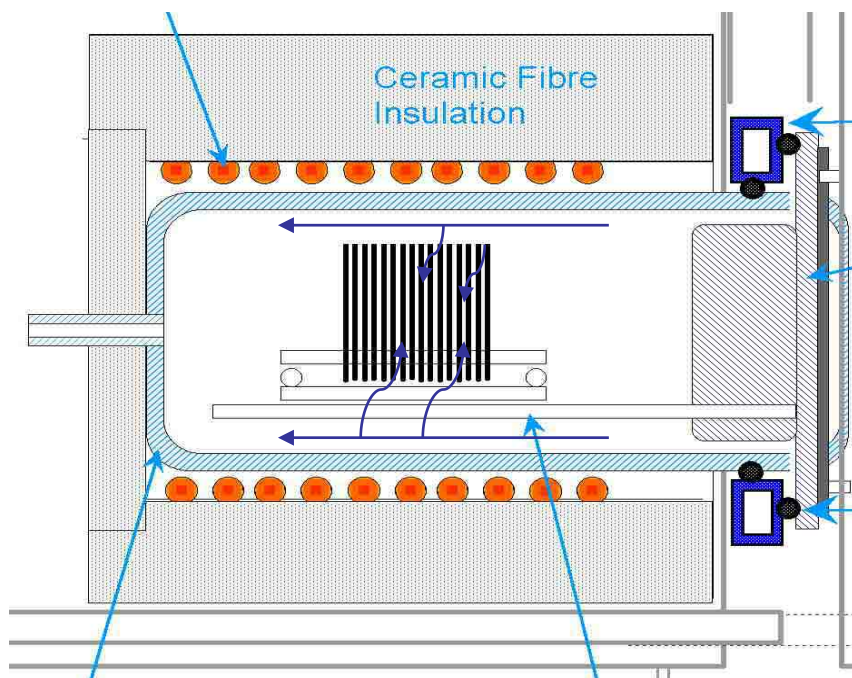


egyenletesség $\pm 10\%$, főleg egyszeletes reaktorok

- SiO_2 : szilán és oxigén / 450oC

Alacsony nyomású CVD - LPCVD

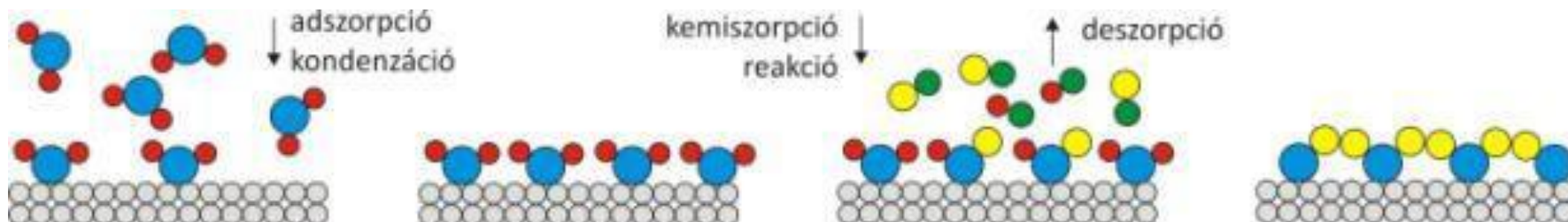
- Nagy szabadúthossz
- Sebességmeghatározó: kémiai reakció
- Termikus / plazma aktiváció



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

ALD – atomi réteg leválasztás

- Sebességmeghatározó: kemisorpció
- Termikus / plazma aktiváció

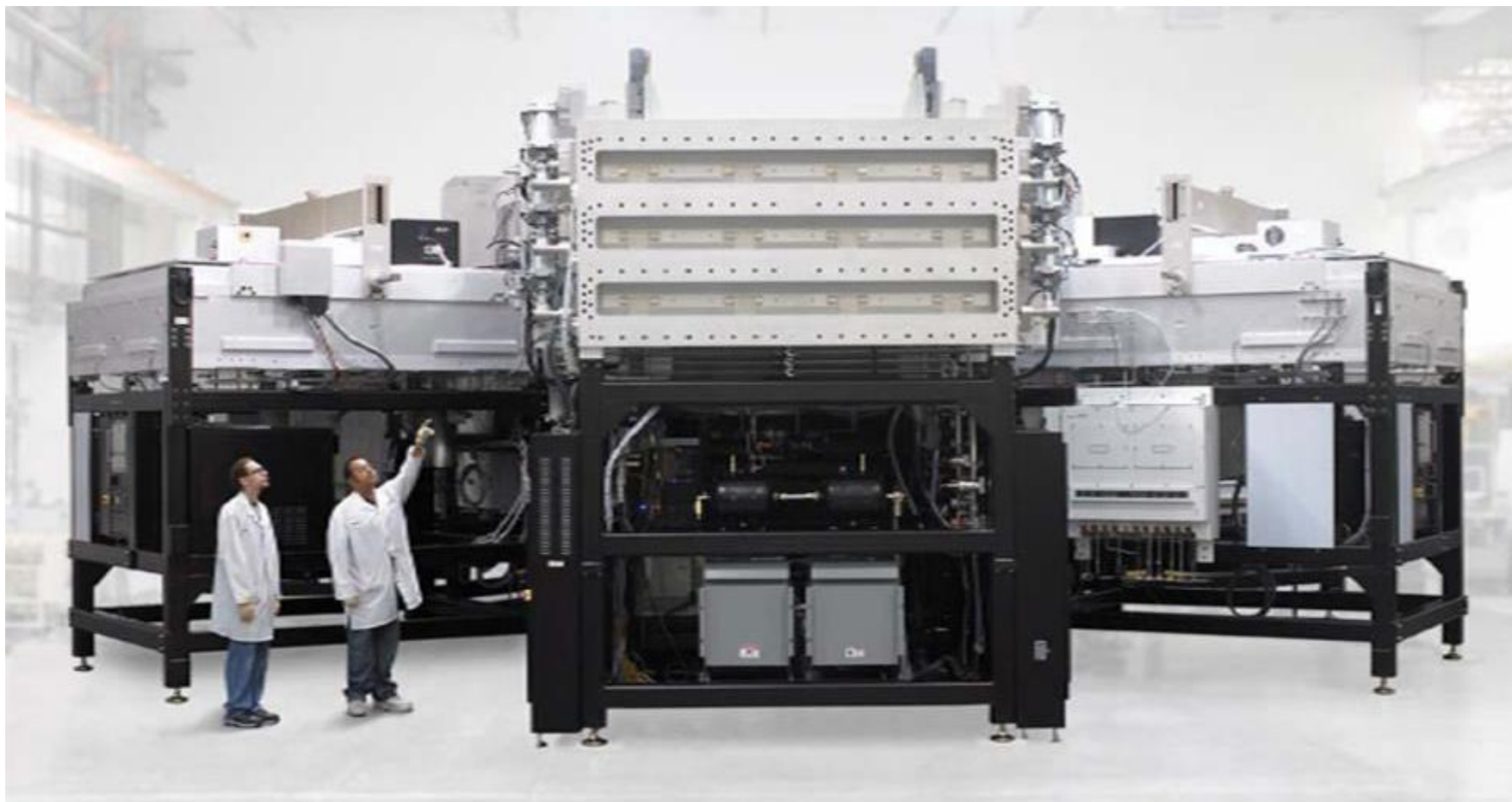


- atomi pontosság
- nagy homogenitás
- kiváló lépcsőfedés
- batch és egyszeletes reaktorok

Jellemző anyagok: Al_2O_3 , ZnO , HfO , ...



Vékonyrétegek – technológiák



MARÁSOK

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, ami 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

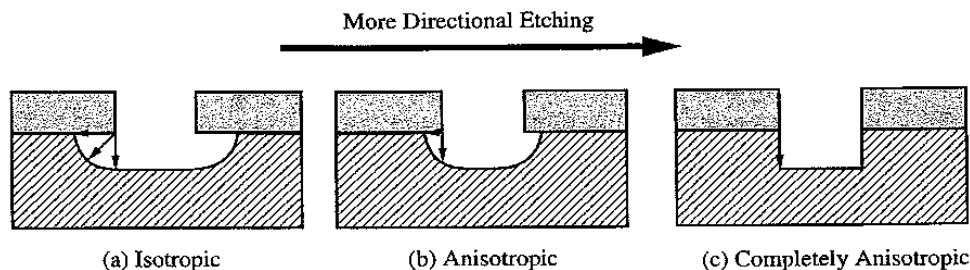
Szeletprocesszálás

- Fotoreziszt hívás
- Oxidok és nitrdek 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 (poliy-gate)

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

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

Marások szerepe a mikrotechnológiában



Cél:

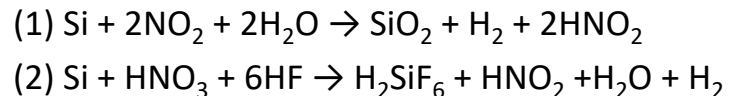
3D struktúra kialakítása

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

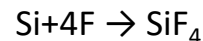
Si nedves kémiai marása: $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ elegyében



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

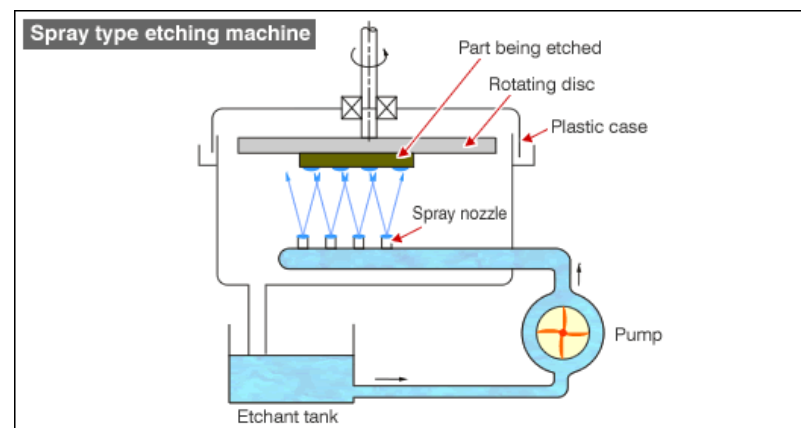
- Hatékony sebességkontrol (paraméterek: porlasztási cseppméret és nyomás)
- Megnövelt marási sebesség a folyamatosan friss marószer miatt
- Kevés szelet

Kemo-mechanikai marás

- Szeletpolírozás (Si szelet vagy polimerek)

Elektrokémiai marás

- Szelektivitás és sebességkontrol (paraméterek: potenciál vagy áram)



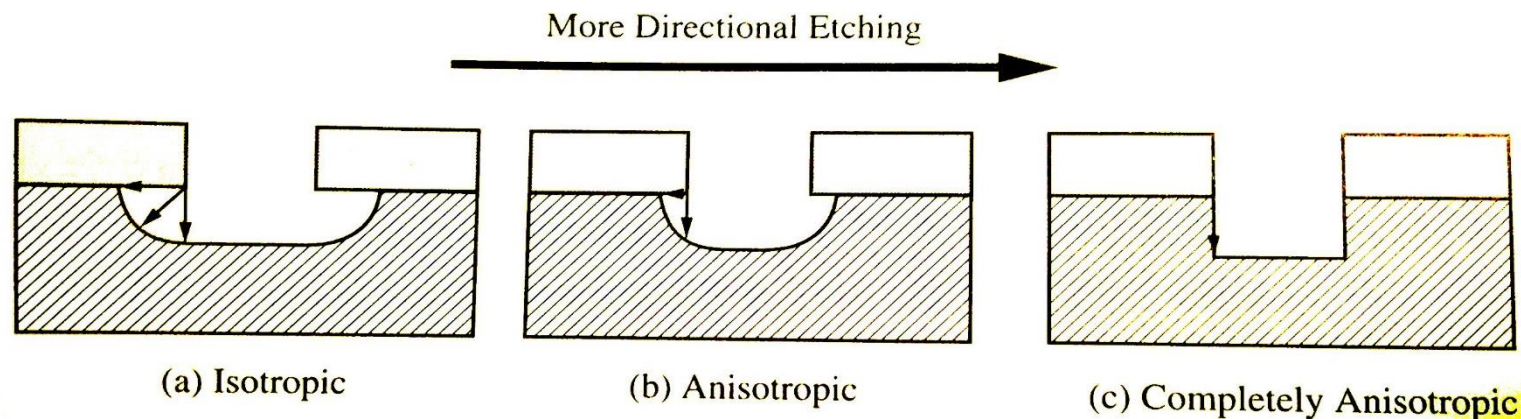
Nedves marások sebesének irányfüggése

Izotróp marás: a reakciósebesség irányfüggetlen

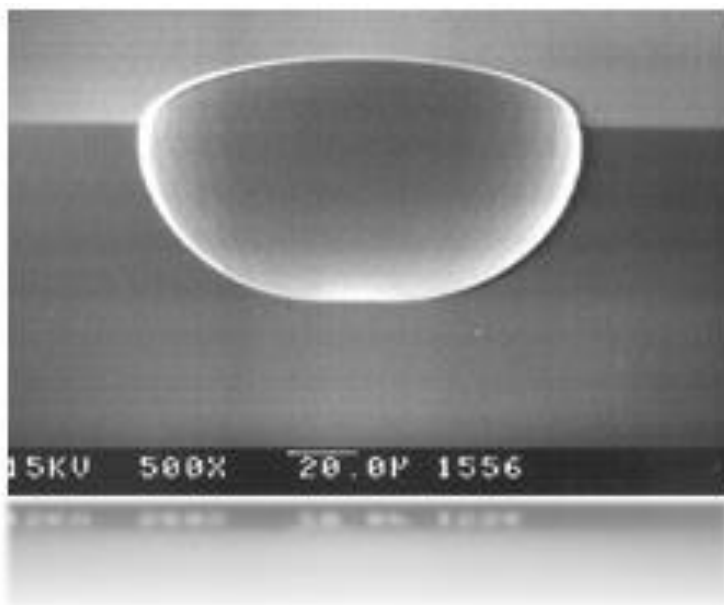
- Amorf és polikristályos anyagok marása jellemzően izotróp
- Jellemzően diffúziólimitált folyamatok

Anizotróp marás: a reakciósebesség irányfüggő

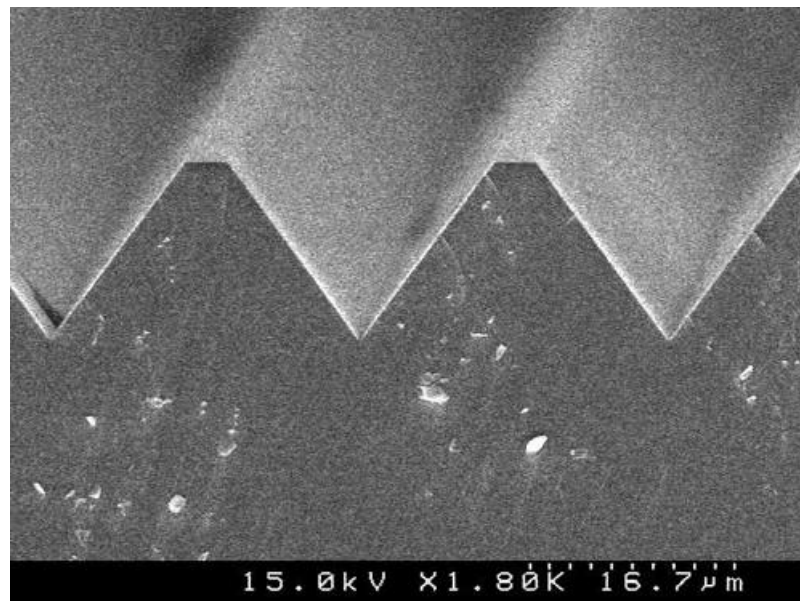
- Kristályos anyagok marása lehet izotróp és anizotróp a marószer összetételétől és a reakciókinetikától függően
- Jellemzően reakciólimitált folyamatok



Szilícium marása



Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség (pl. poli-maró - HF-HNO_3 - CH_3COOOH)

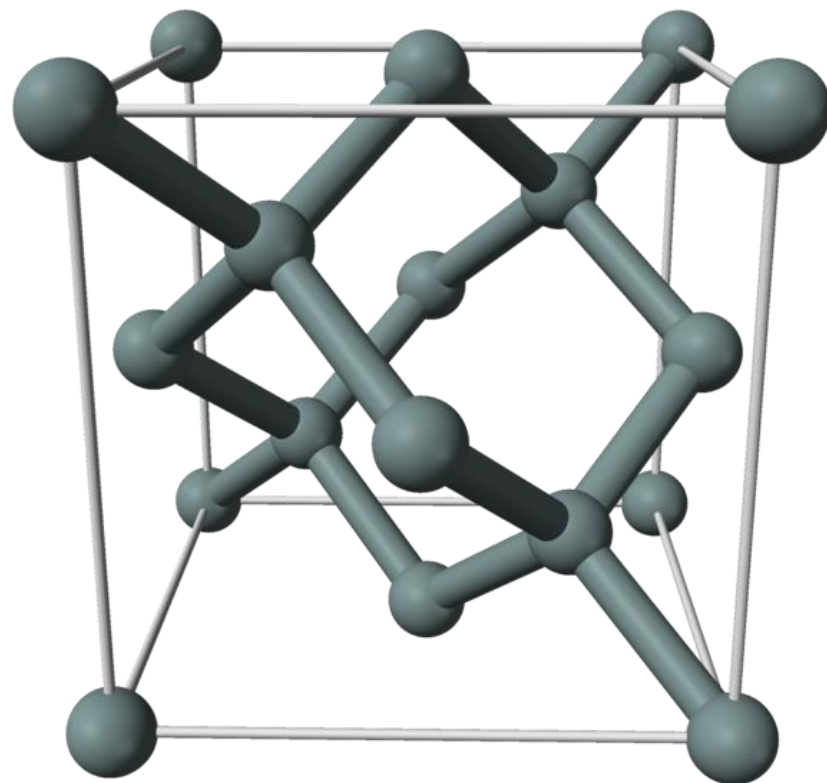
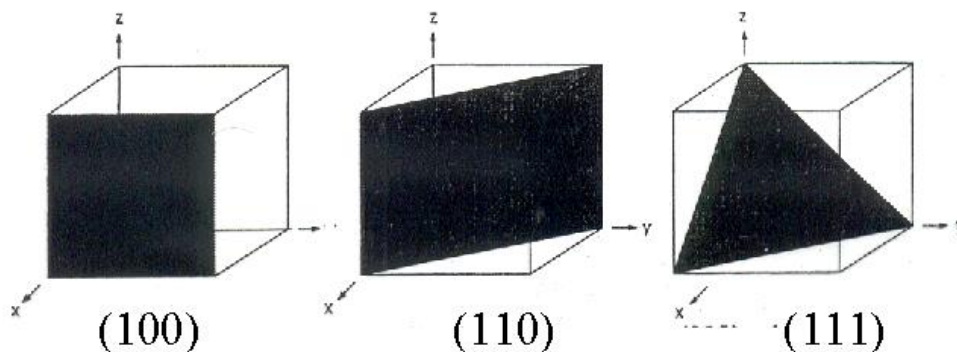


Anizotróp: a különböző kristálytani irányokban más és más a marási sebesség (pl. lúgos maró – KOH)

Marási sebesség irányfüggése

Szilícium rácsszerkezete: gyémántrács

Legegyszerűbb kristálytani síkok:



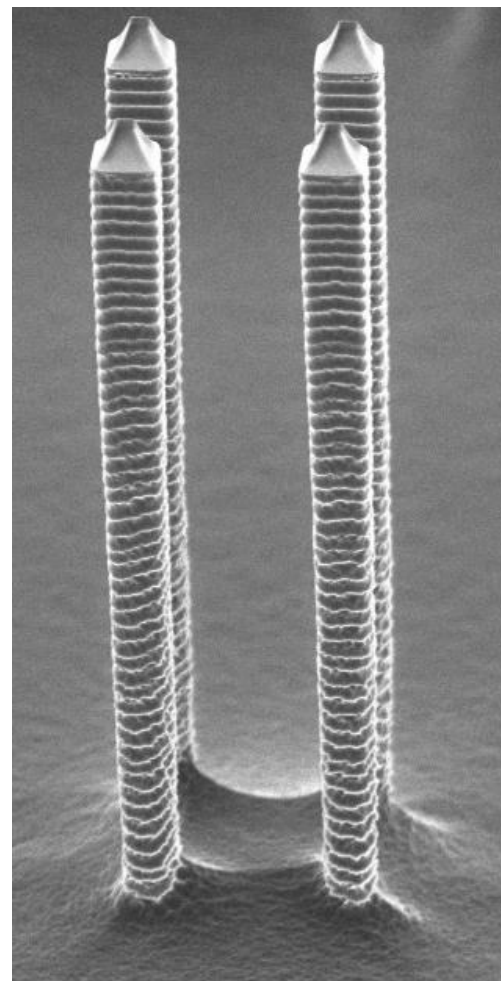
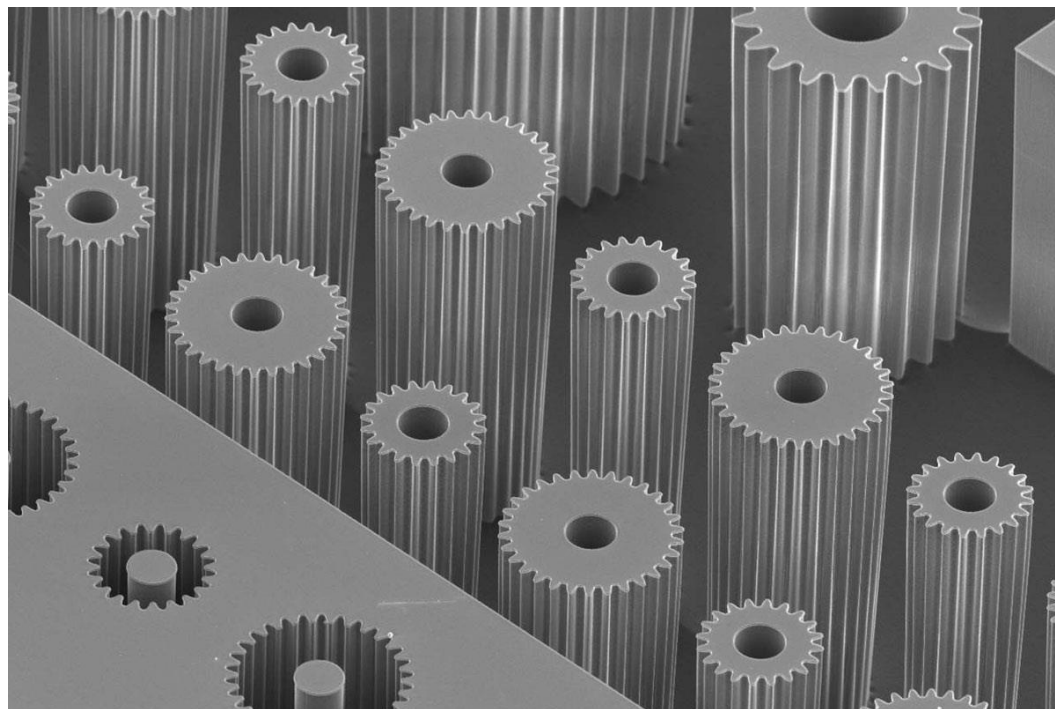
Si-Si kötési energia:

$$E_{\sigma(\text{SiSi})_{(111)}} \gg E_{\sigma(\text{SiSi})_{(100)}} > E_{\sigma(\text{SiSi})_{(110)}}$$

Marási sebesség:

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

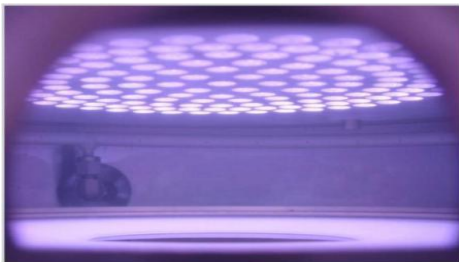
Szárazmarások



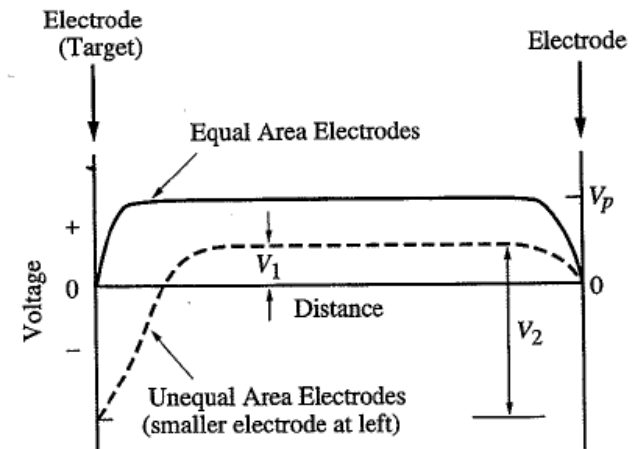
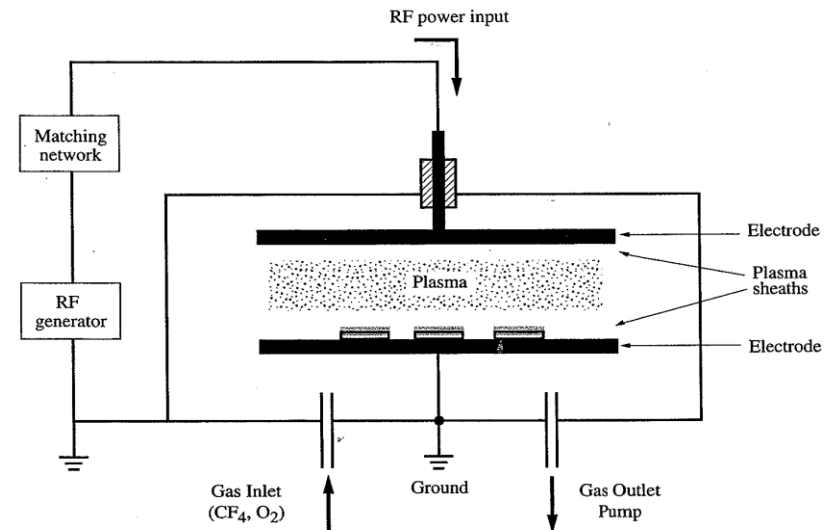
Plazma marások jellemzői

Plasma Glow

- Alacsony gáz nyomás (1 mtorr-1 torr)
- Nagy elektromos teret kapcsolunk az elektródákra, 13.56 MHz RF
- Gáz atomok egy része ionizálódik : e^- + ionok



plasma glow – vezető gáz
(ionok, szabad gyökök, elektronok, semleges részek),
a gyorsan mozgó elektronok gerjesztik a részecskéket
ezek relaxálódnak és fotont bocsátanak ki



Száraz marások

- Hatékonyabb **kémiai** marás reaktív gyökök jelenlétében (pl. atomos F)
- Irányított anizotróp **fizikai** marás töltött részecskékkel (sűrűbb struktúra)

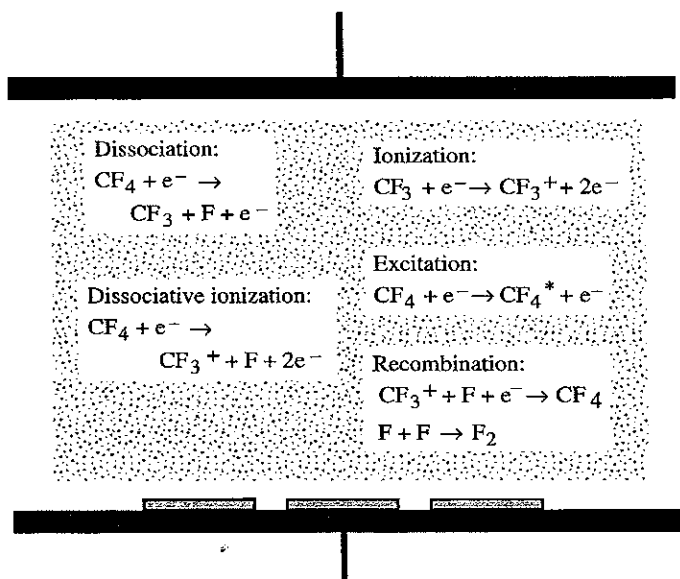


Figure 10-9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

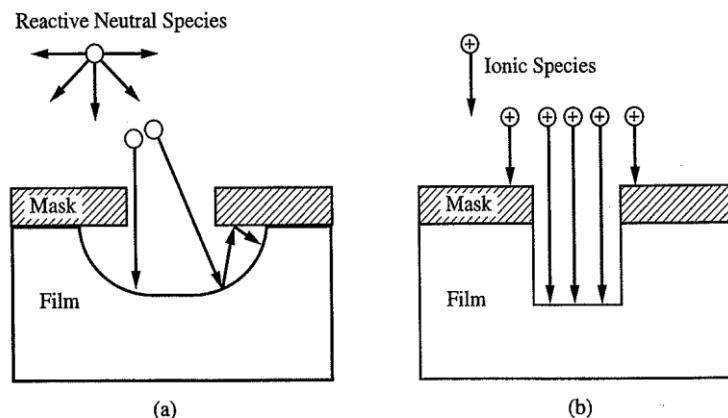
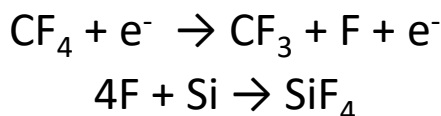


Figure 10-11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient (assumed equal to 1).

Kémiai marás

Szabad gyökök (semleges, nemkötő elektronpárral rendelkeznek) – igen reaktív



A reakcióterméknek **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. **O₂ gáz** a disszociált CF₃, CF₂-vel reagál, ezzel **megakadályozza a rekombinálódást** CF₄-gyé, ezzel **növeli a szabad F jelenlétét** DE: túl sok O₂ túlságosan felhígítja a maró gázt!

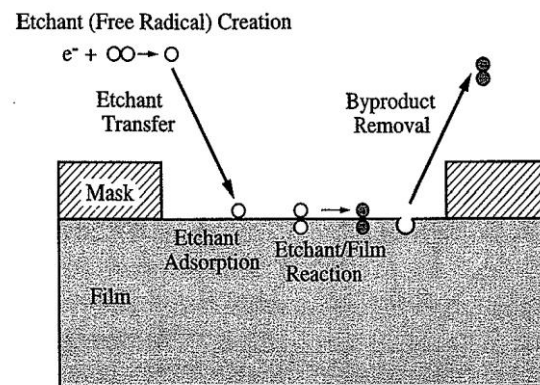


Figure 10-10 Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

Izotróp a marás, mert

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

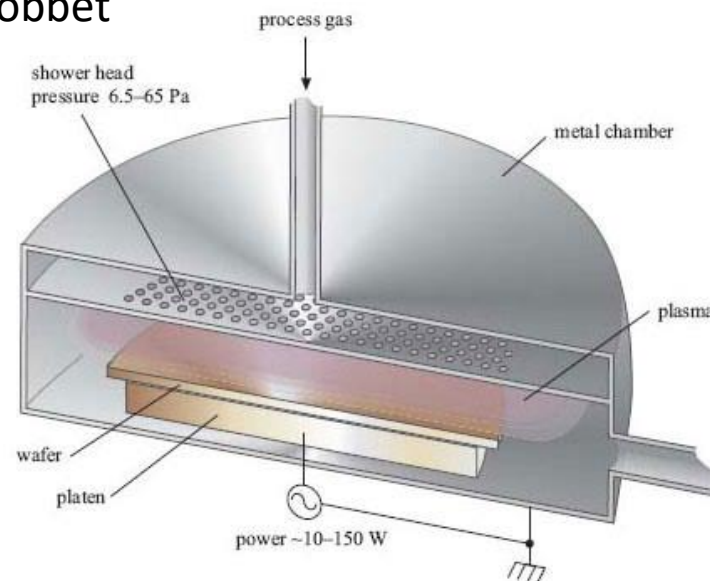
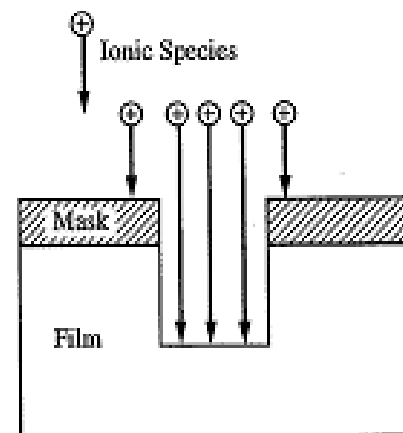
Nagy szelektivitás érhető el

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

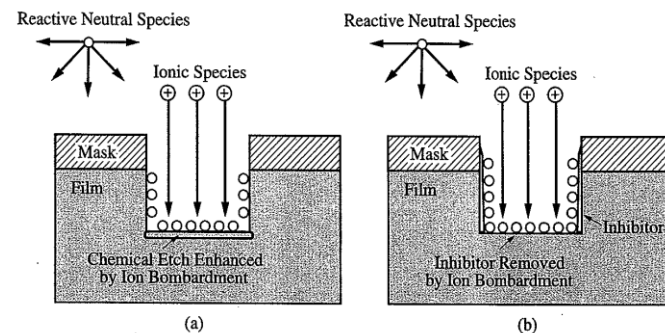
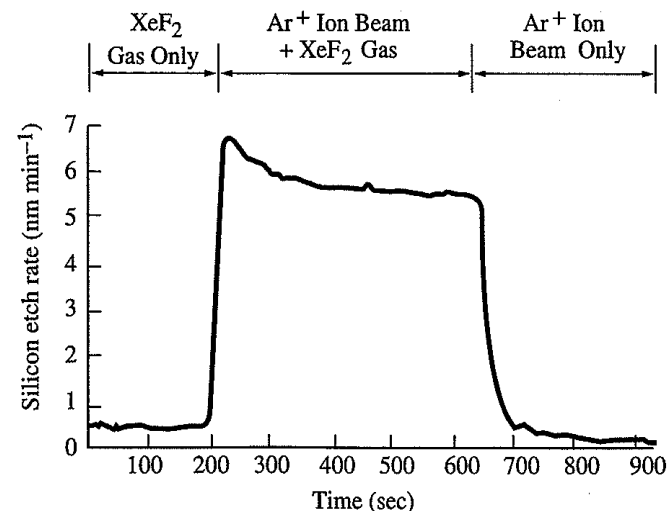


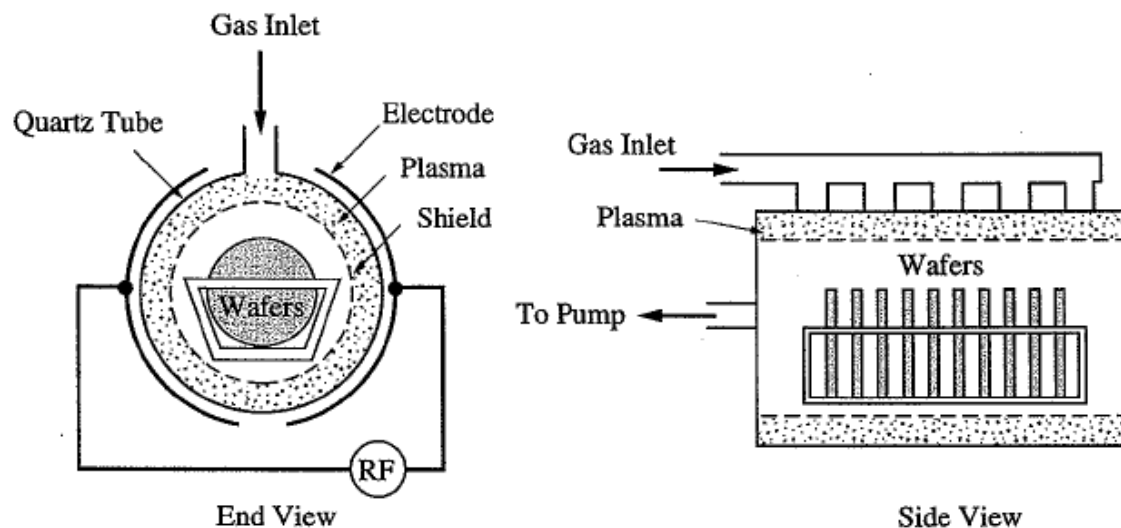
Figure 10-13 Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

Plazma maró berendezések I.

Hengeres plazmamaró

- A szelet nem az elektródán ül, de sok elfér benne
- Izotróp kémiai marás, nagy szelektivitás, kis hibakeltés
- Egyenetlen kívülről befelé haladva
- $p=10\text{-}1000\text{ mtor}$

Nem kritikus
marási lépésekhez
pl. reziszt eltávolítás
 O_2 -ben (ashing)



Plazma maró berendezések II.

Sík plazmamaró - Plazma mód

- A szelet a (nagyobb) földelt elektródán ül a másik felé nézve – egyenletesebb marás, főként kémiai, jó szelektivitással, enyhe anizotrópia
- Ion bombázás is van, de nagyon gyenge, a feszültség esés 10-100V
- A kisebbik elektróda porlódik
- $p=10\text{-}500\text{mtorr}$
- ionkoncentráció $\sim 10^9\text{-}10^{10}\text{cm}^{-3}$

Nem kritikus marási lépésekhez
pl. reziszt eltávolítás O_2 -ben (ashing)
pl. izotróp nitrid marás

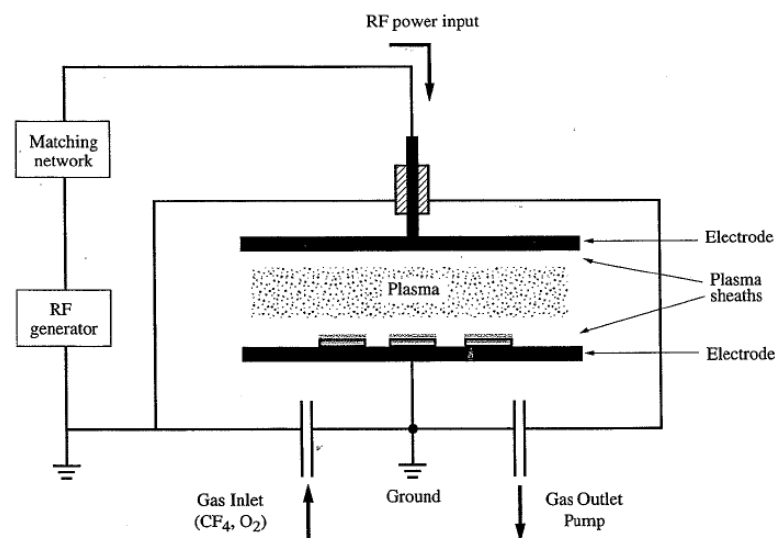


Figure 10-7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

Plazma maró berendezések III.

Sík plazmamaró – RIE (Reactive Ion Etching) mód

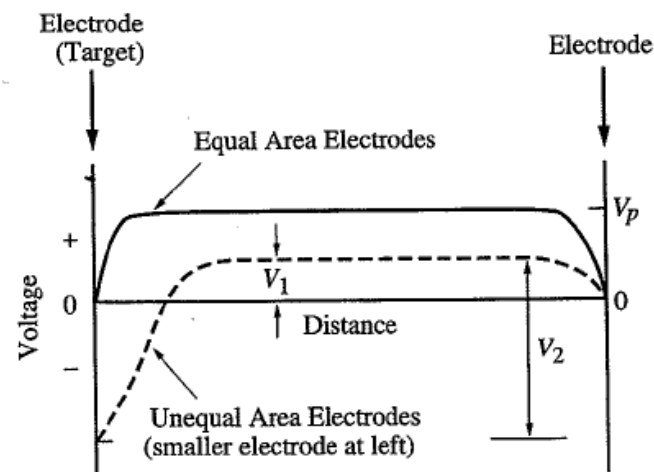
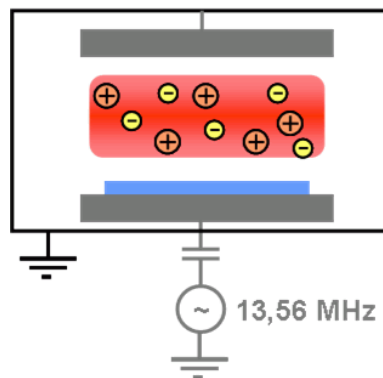
- A szelet a kisebbik elektródán ül, gyakran csak egy szelet
- A nagyobbik a földelt elektróda, csatlakoztatva a kamra falához, jelentősebb a feszültség esés 100-800V tartományban (bias) - ion segített anizotróp marás lehetséges
- kisebb nyomás esetén még irányítottabb a marás, de kisebb a plazma sűrűség is (10-100 mtorr), ionkoncentráció $\sim 10^9$ - 10^{10} cm^{-3}
- kis marási sebesség 100 nm/perc
- Rácshibák, töltődés, árkok (trenching)

Példák:

SiO_2 : CHF_3

poli-Si, Si_3N_4 : $\text{SF}_6 + \text{O}_2$, NF_3

Al: Cl_2 , BCl_3



Plazma maró berendezések

HDPE - High Density Plasma Etching

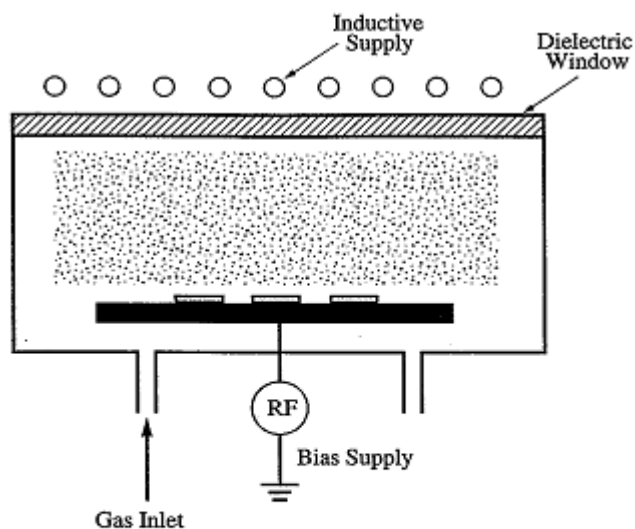


Figure 10-16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **Plazma sűrűség és Ion energia** egymástól függetlenül
- ECR (electron-cyclotron-resonance) vagy ICP (inductively coupled plasma) forrás 10^{11} - 10^{12} ion/cm³ 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

$\text{SF}_6 + \text{O}_2$ @ cryo °C

Pulsed mode DRIE / Bosch

$\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ @ RT

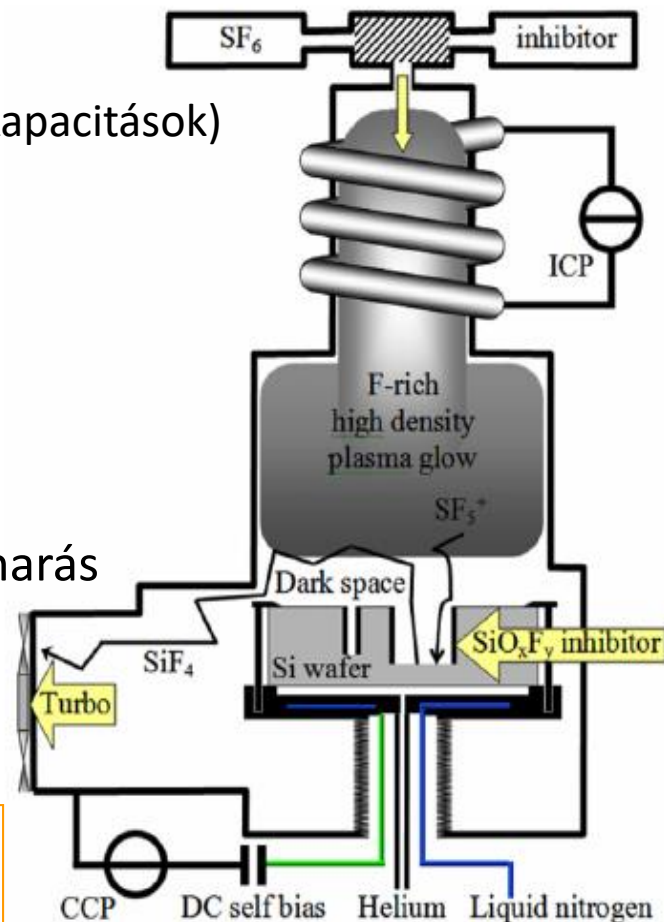
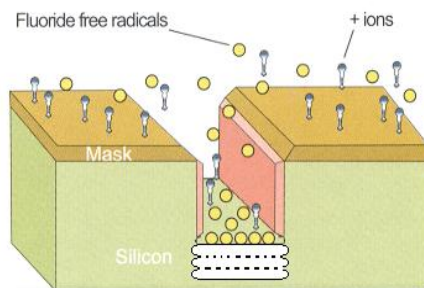
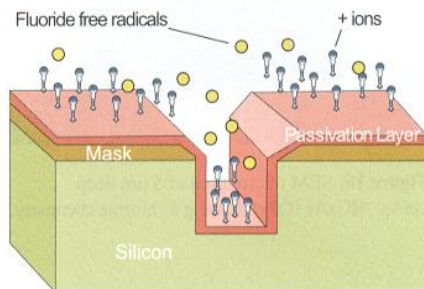
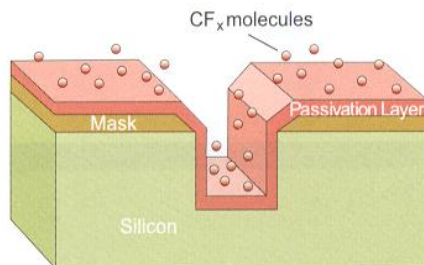
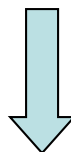


Figure 1. A dual source DRIE system.

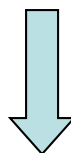
DRIE – Bosch Process



- 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



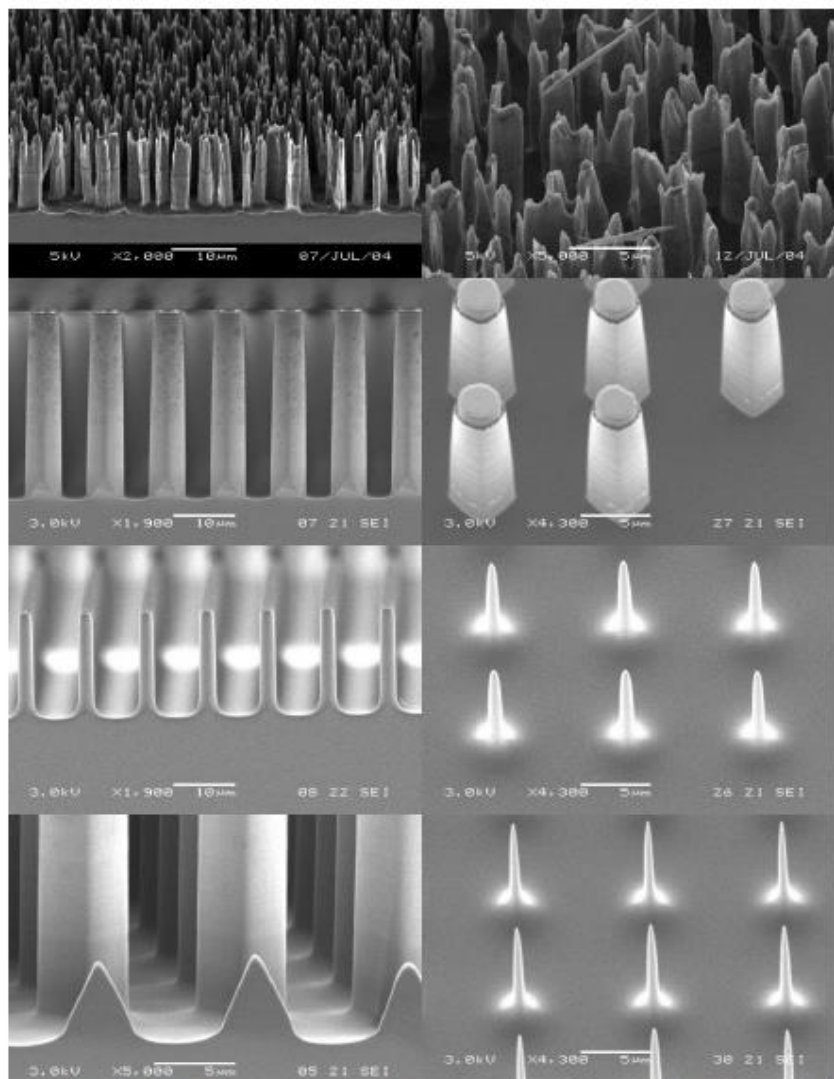


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

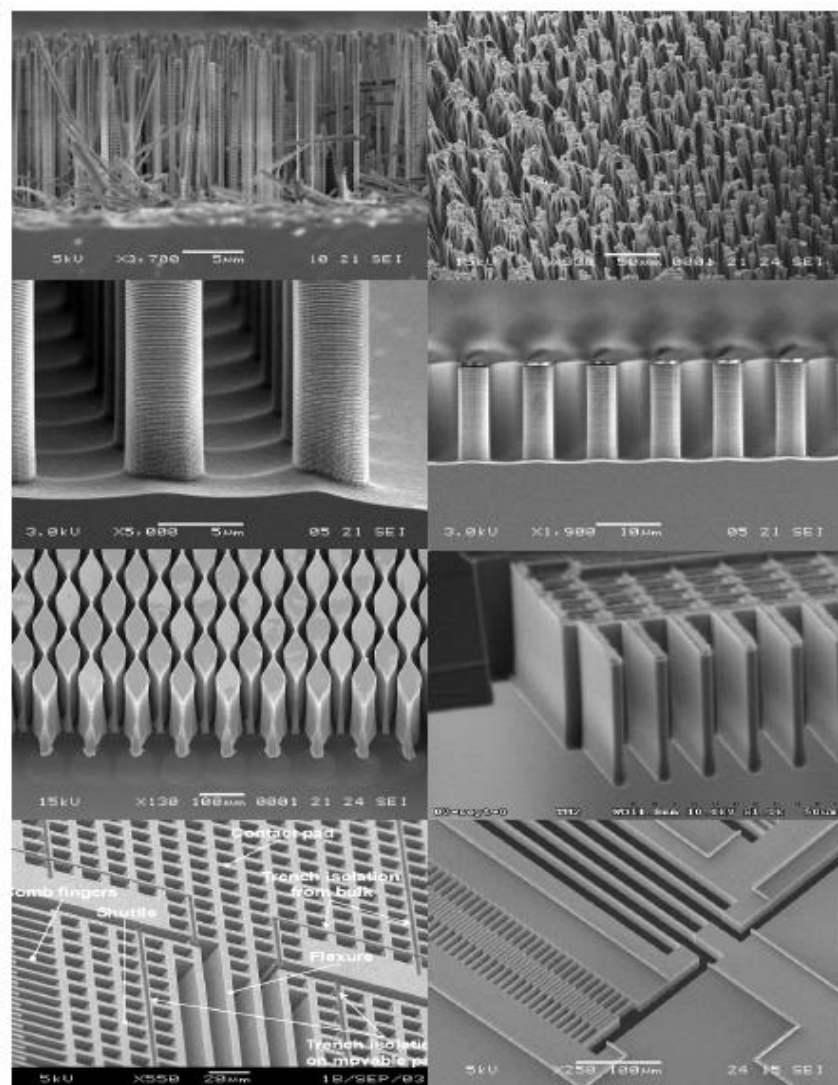
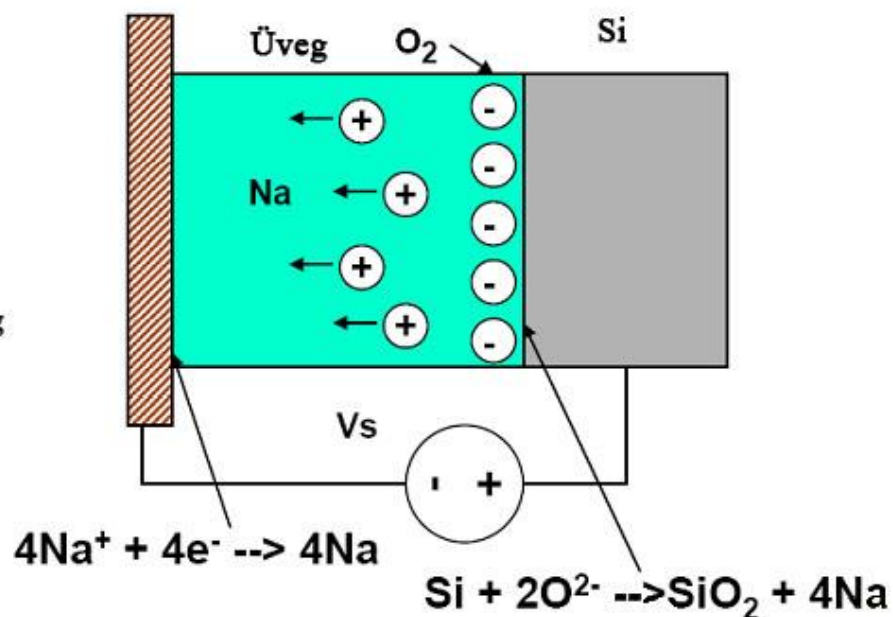
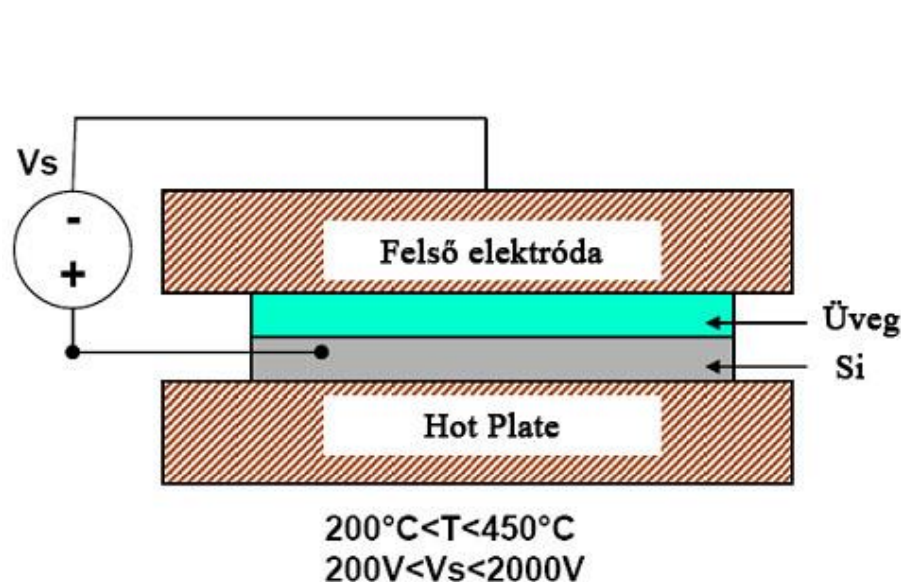


Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).

SZELETKÖTÉS

Anódos szeletkötés

- Speciális üveg (magas alkáli-ion tartalom)
- Na^+ ionok mozgása – kiürített réteg
- Oxigén kötésbe lép a szilíciummal
- Kevésbé érzékeny a felületi simaságra

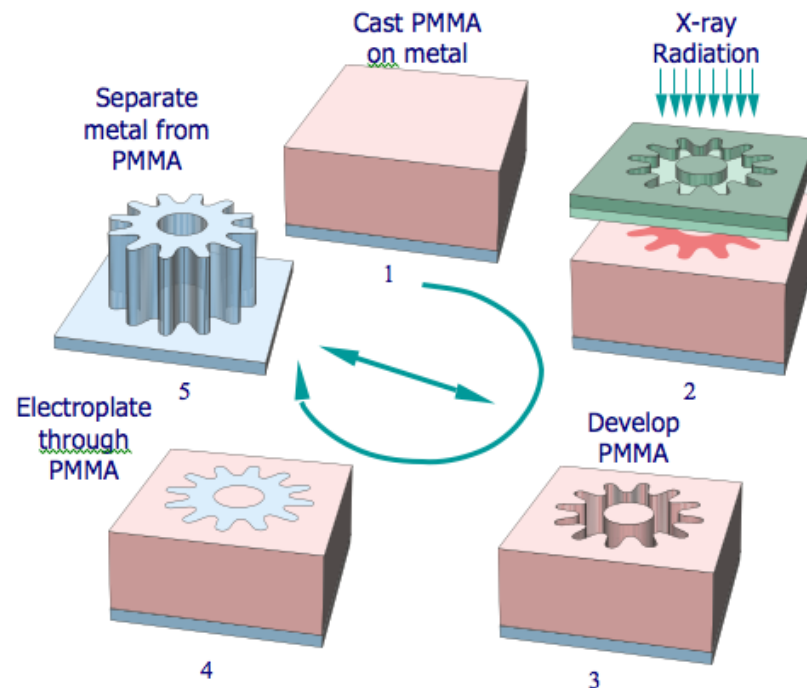


LIGA

LIGA (KIT)

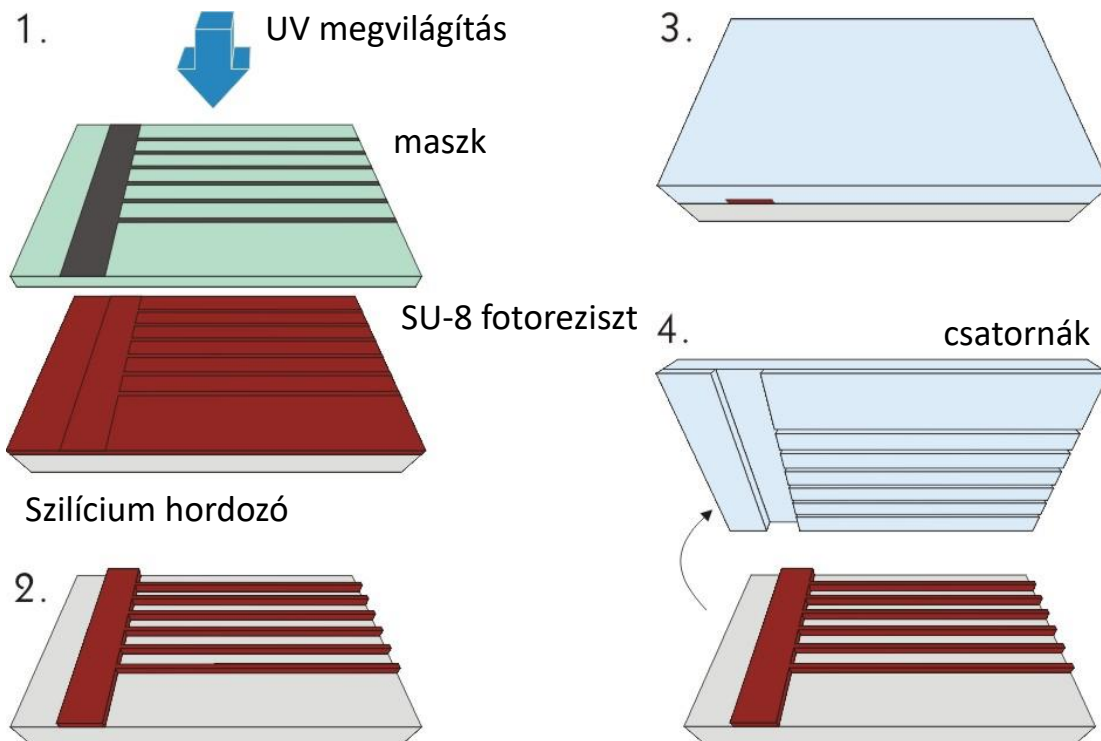
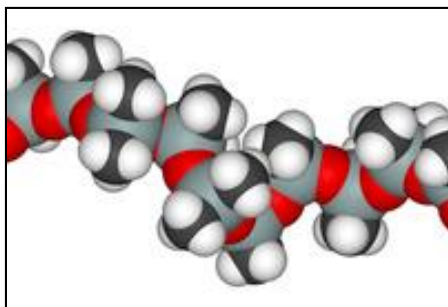
Lithographie, Galvanoformung, Abformung (Litográfia, Electroplating, Öntés)

- 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)



SOFT LITO

Mikrofluidika kialakítása PDMS polimerben

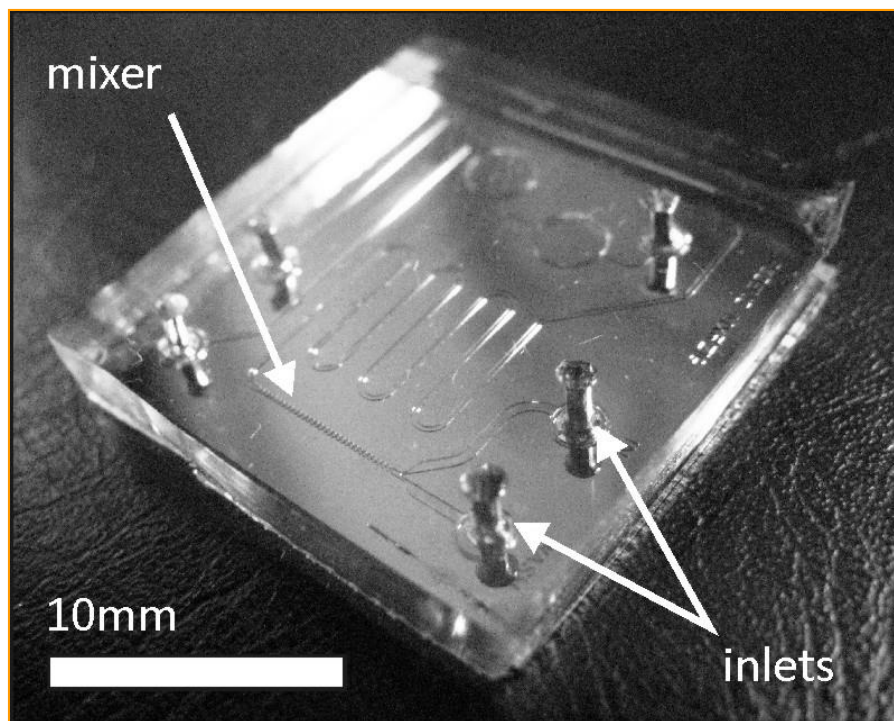
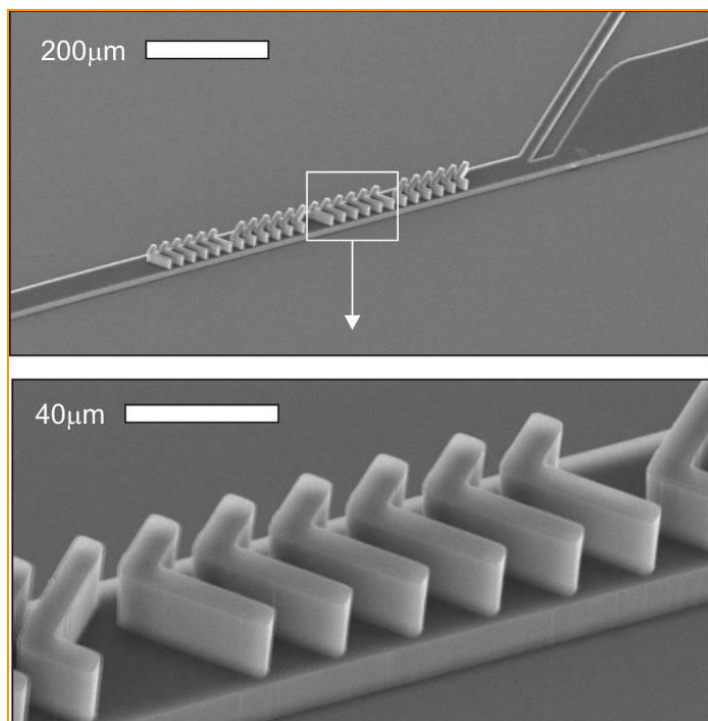


Előnyei:

- biokompatibilis, rugalmas, transzparens
- olcsó, gyors és egyszerű felhasználás
- kovalens kötés önmagával, Si és üveg felülettel

A mikrofluidikai rendszer kialakítása polimerben

- Többrétegű 3D SU-8 technológia az öntőforma kialakításához
- Gyors prototípusgyártás – PDMS öntés



Hering-csont típusú kaotikus keverő

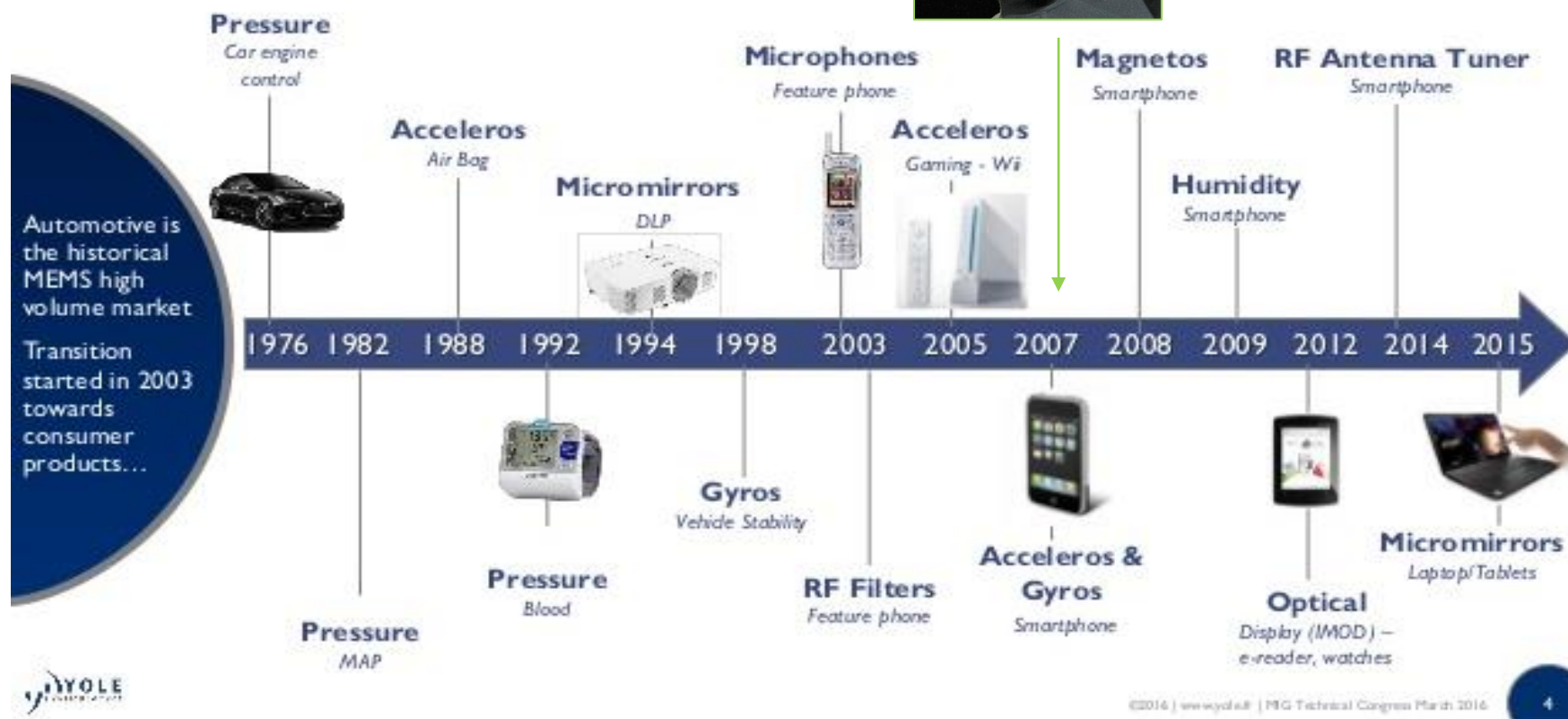
SMART WORLD

A MEMS ESZKÖZÖK TÖRTÉNETE

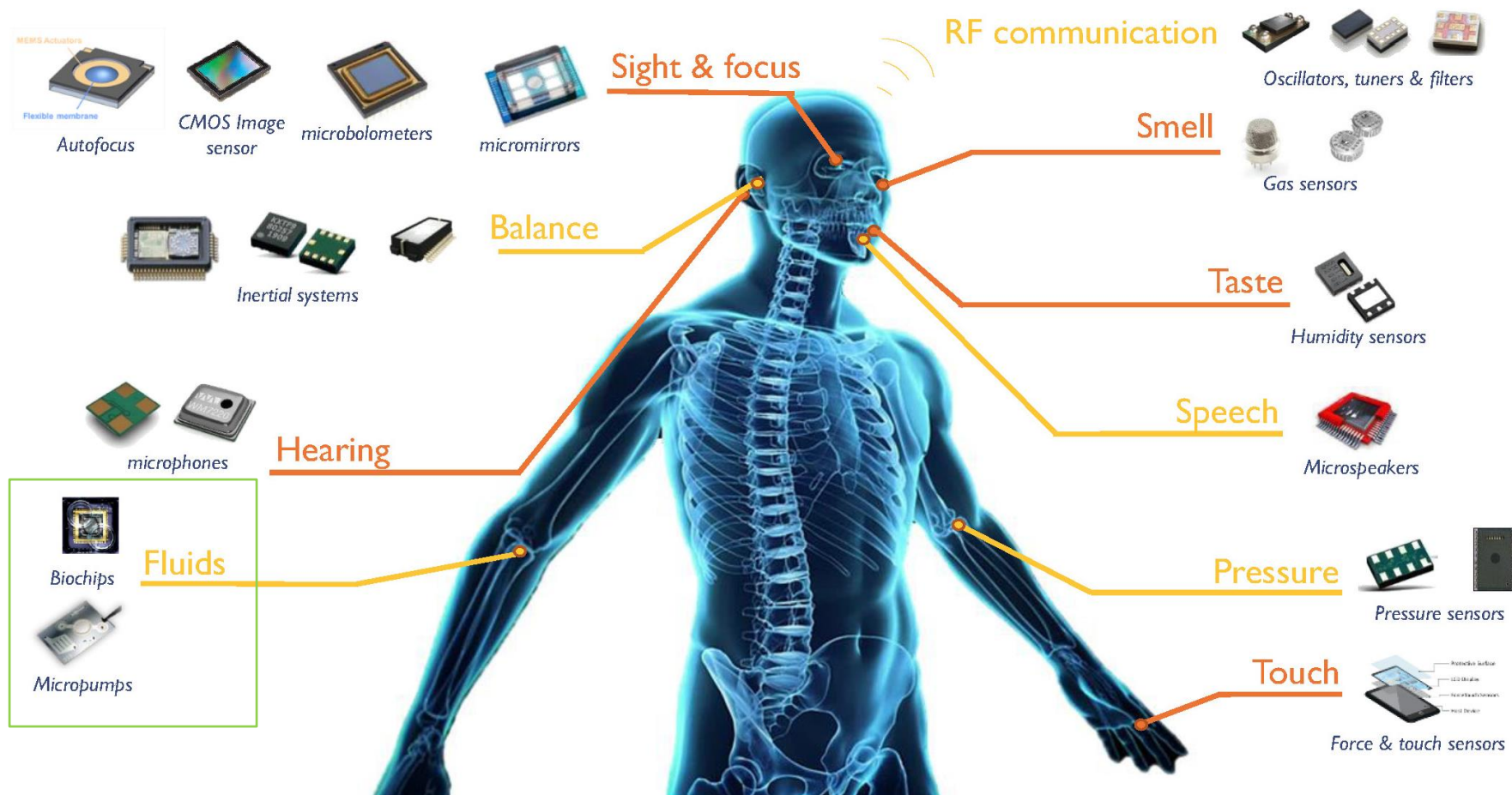
az autóipartól a kommunikációs elektronikáig



Steve Jobs
APPLE

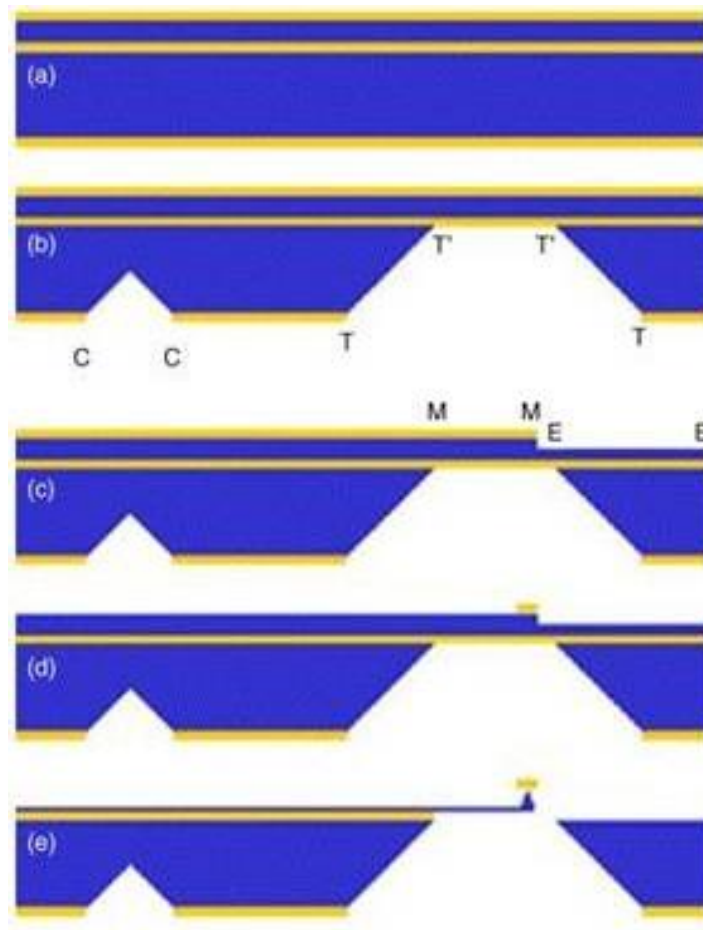
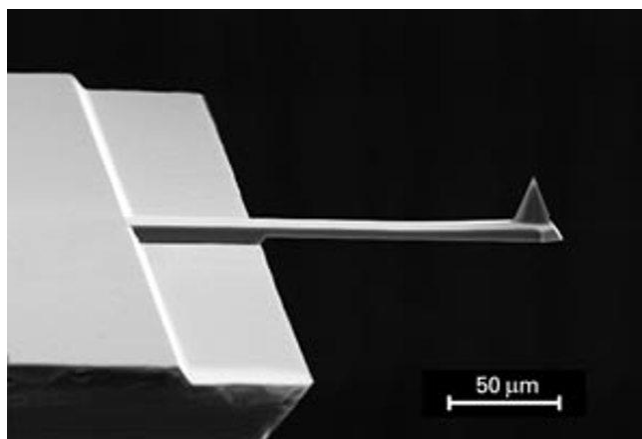
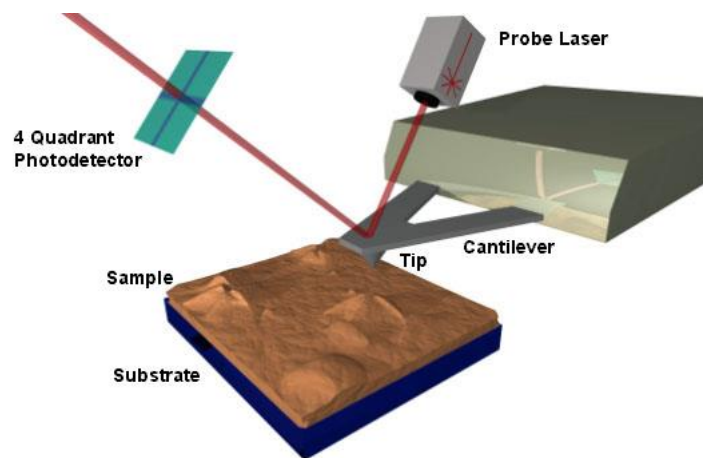


HOGYAN UTÁNOZZUK az EMBERI ÉRZÉKELÉST?

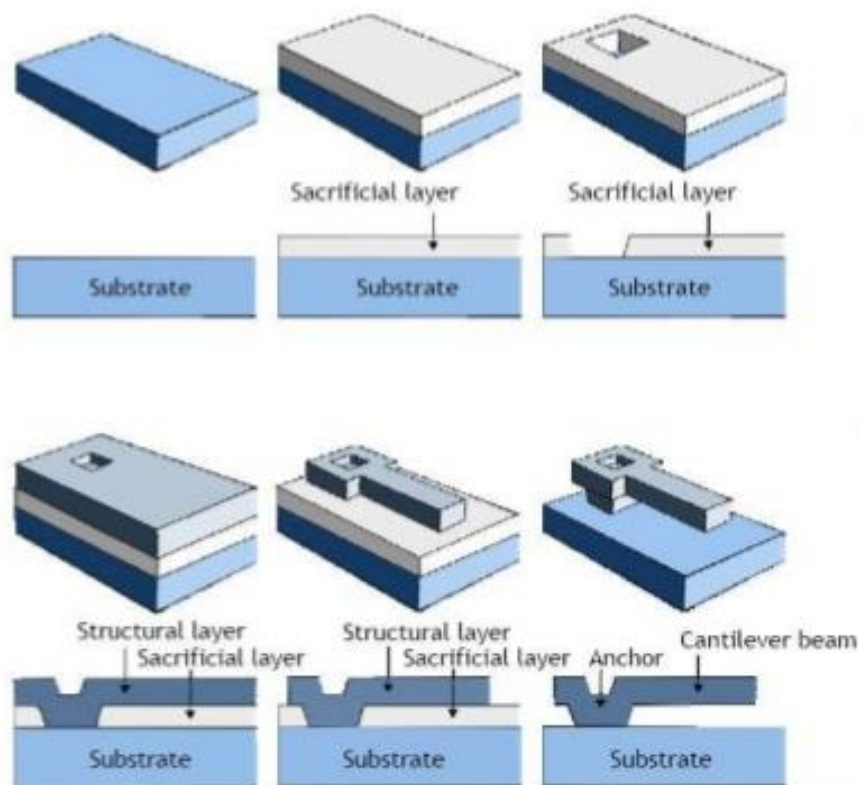
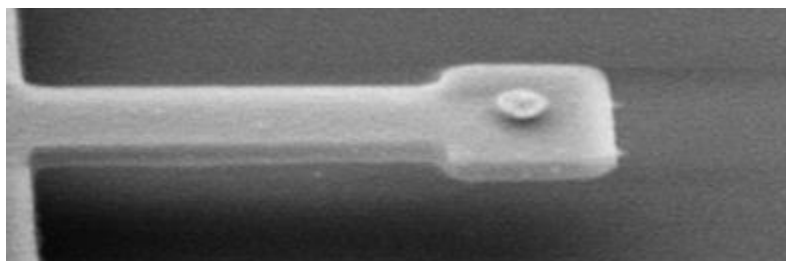
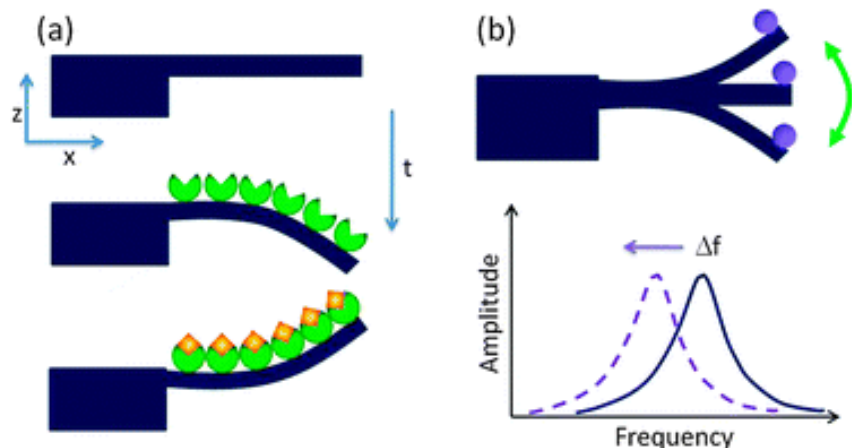


ESZKÖZÖK

KONZOL – TÖMBI MIKROMECHANIKA

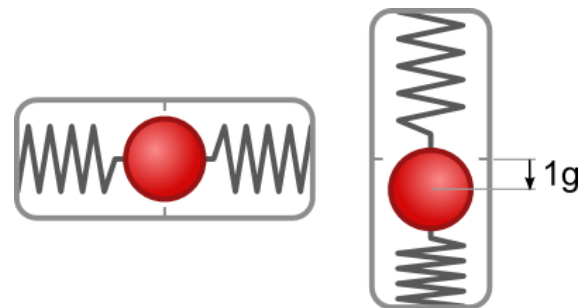


KONZOL FELÜLETI MIKROMECHANIKA

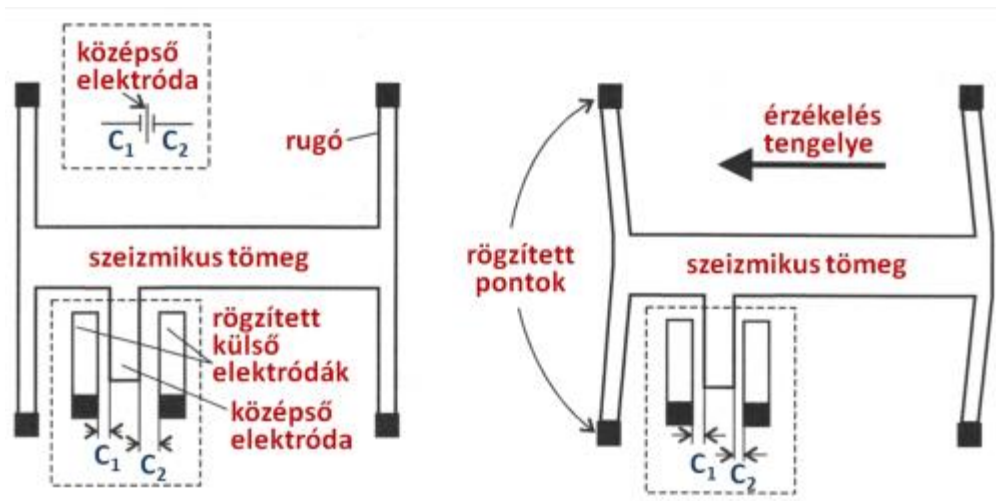


GYORSULÁS - GIRO

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése



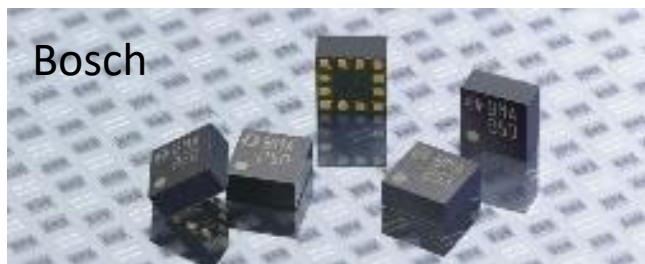
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



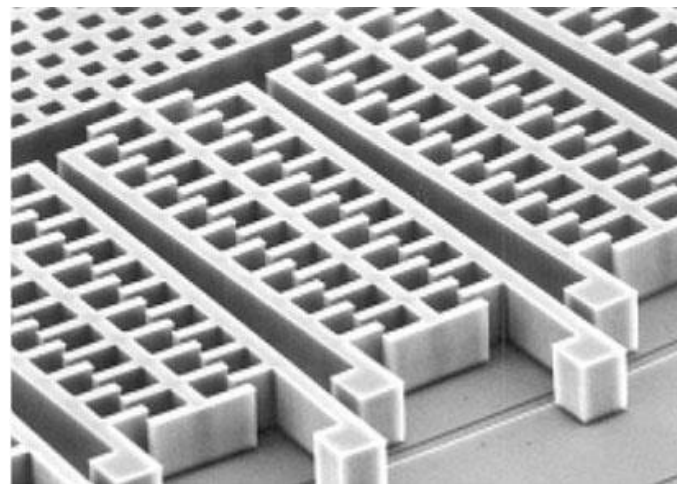
Párhuzamos elektródájú (síkkondenzátor) elrendezésben az érzékenység kis elmozdulások esetén:

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

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

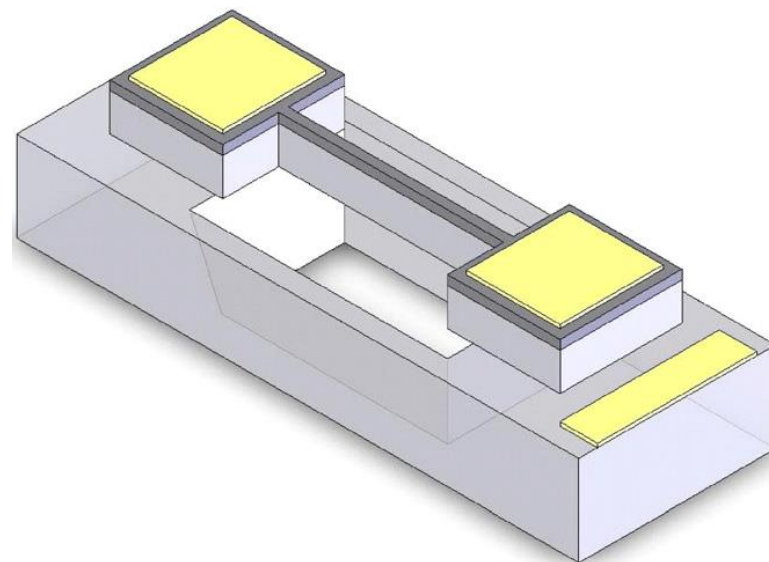
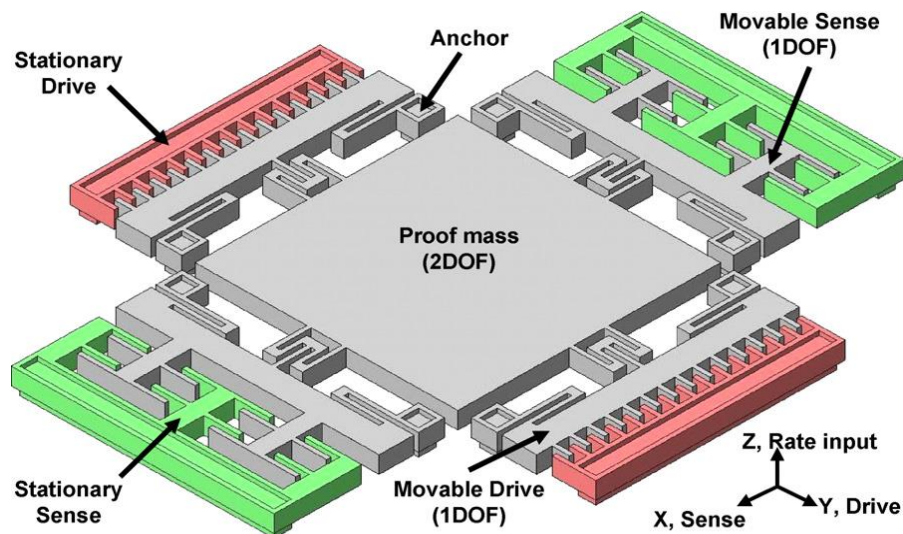


Bosch

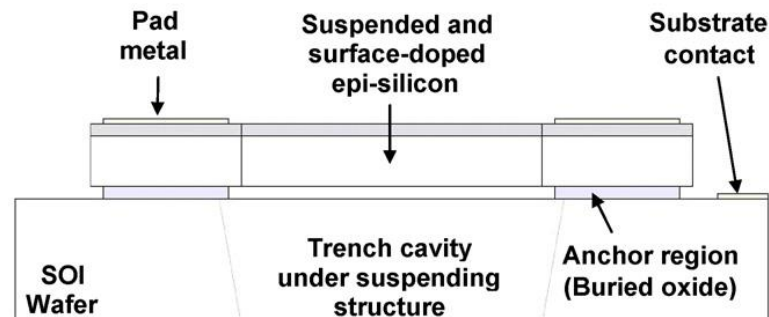
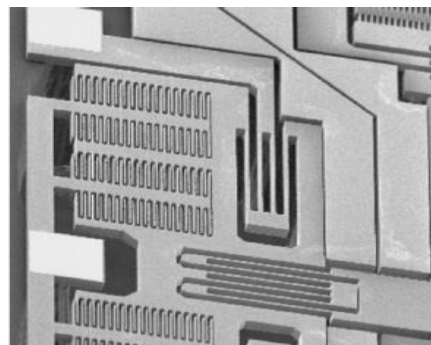
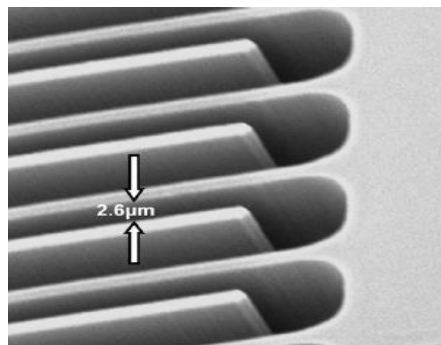


GIRO – TÖMBI MIKROMECHNIKA

SOI



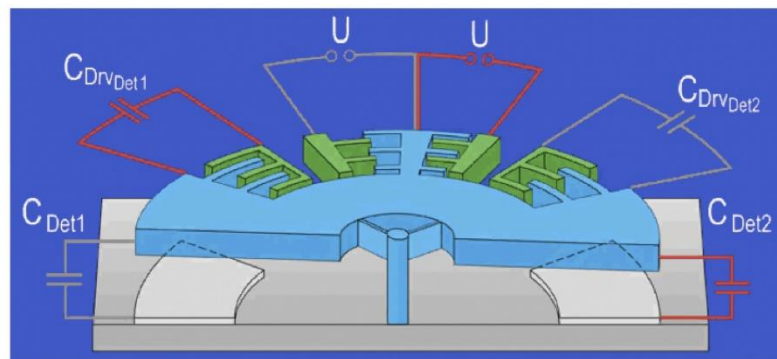
(a)



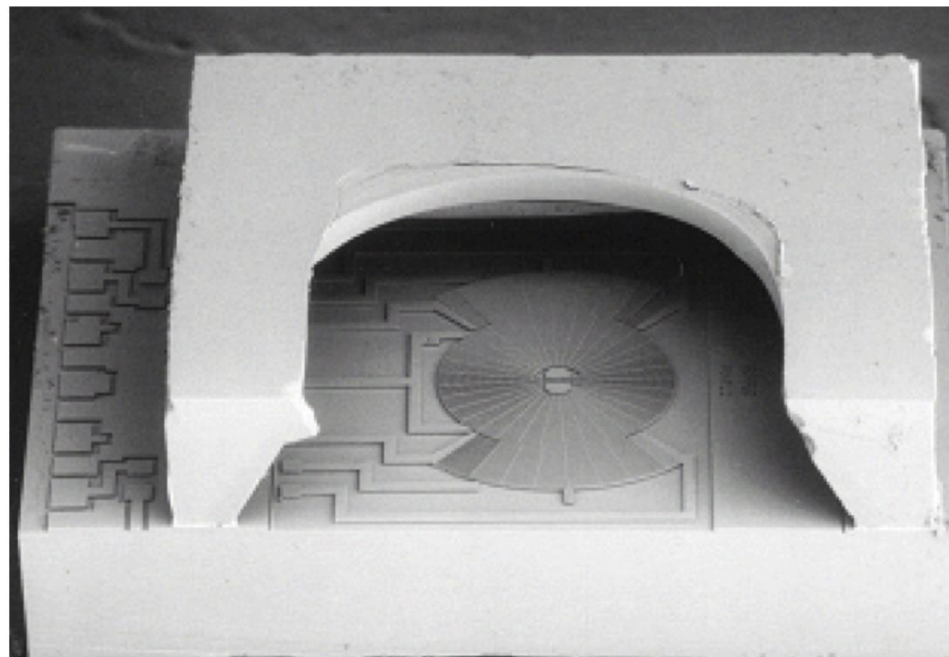
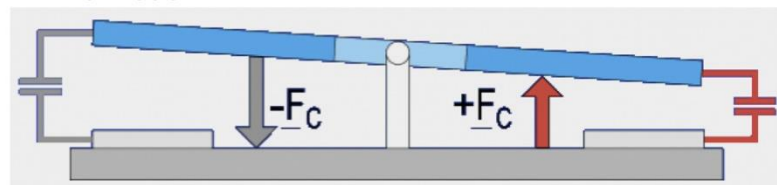
(b)

GIRO – FELÜLETI MIKROMECHNIKA

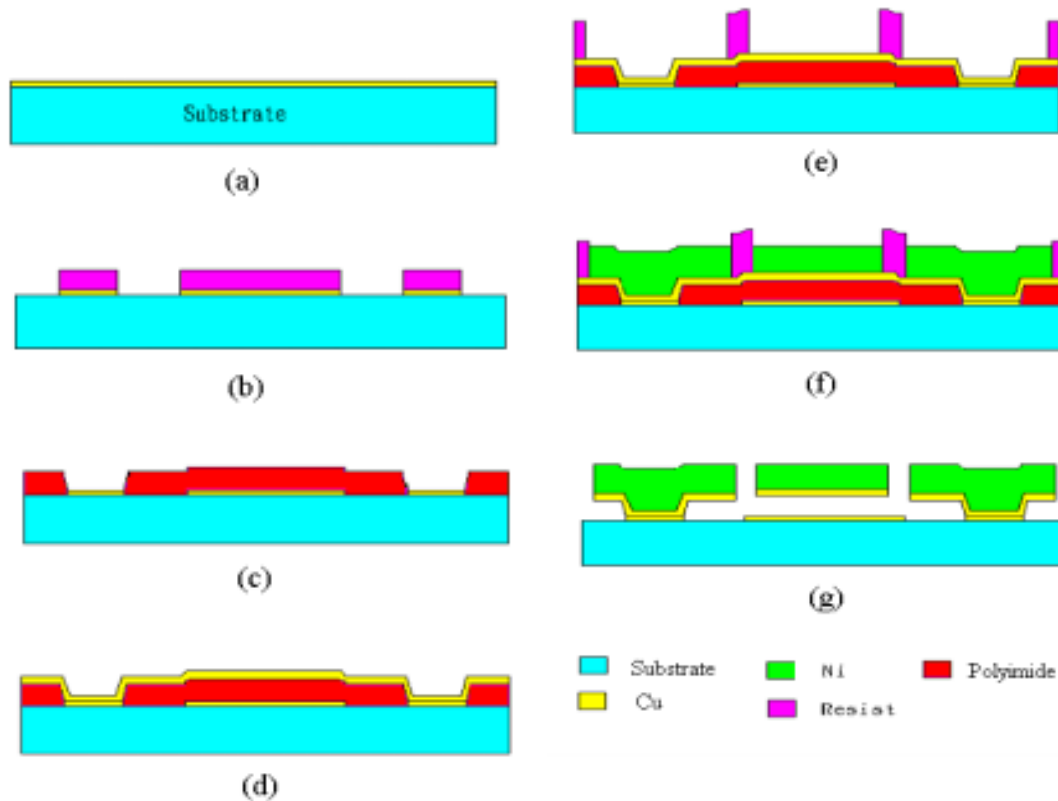
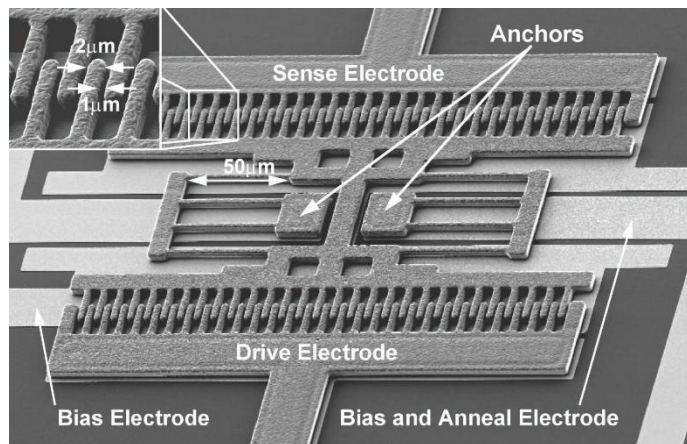
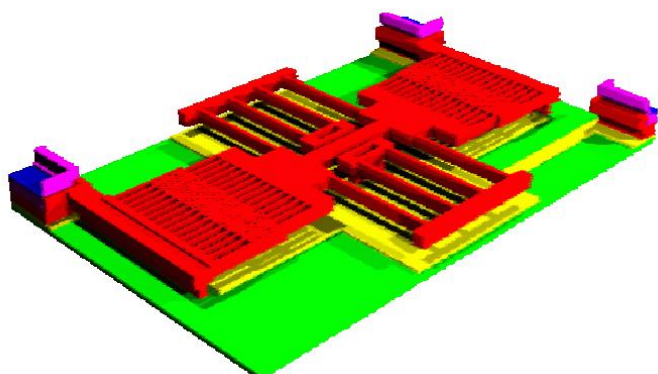
SOI



Drive mode

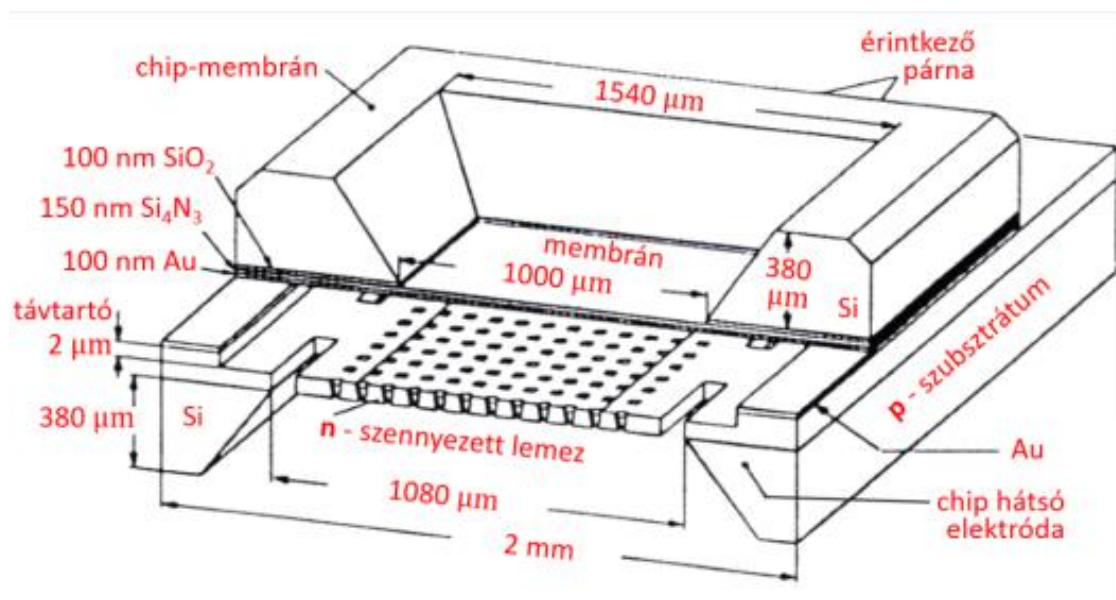


COMB DRIVE – FELÜLETI MIKROMECHANIKA



MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



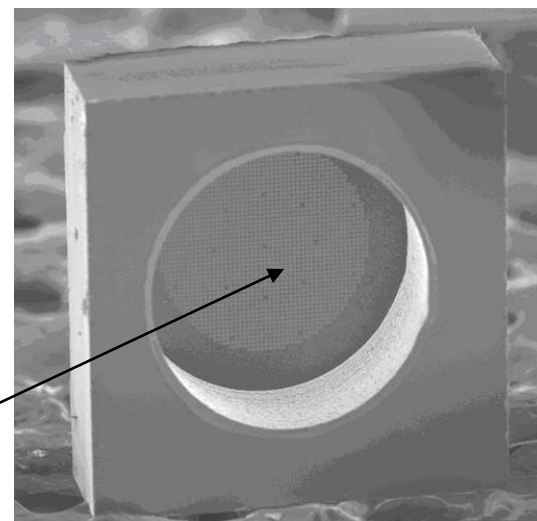
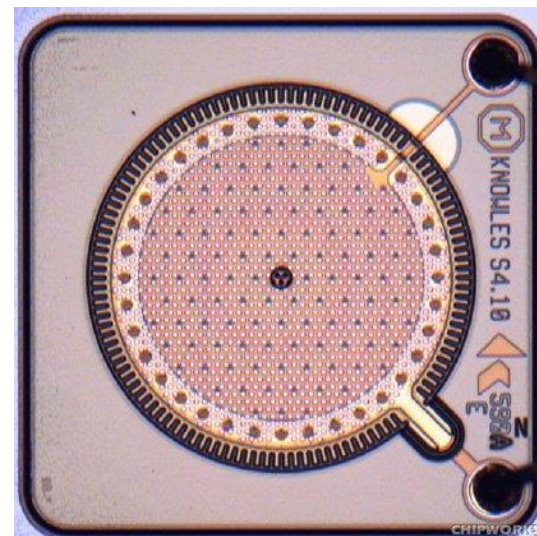
Felső elektróda: Au SiO₂ / SiN_x membránon

Alsó elektróda: nSi

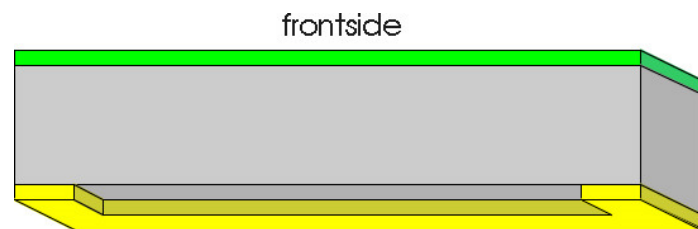
$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d}$$

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

DRIE (mély reaktív ionmarással) mart membrán

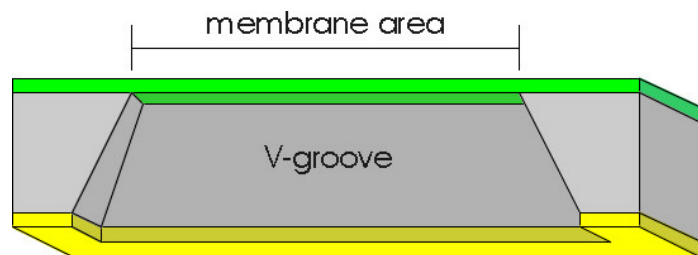


MIKROFON – TÖMBI MIKROMECHANIKA - KOH



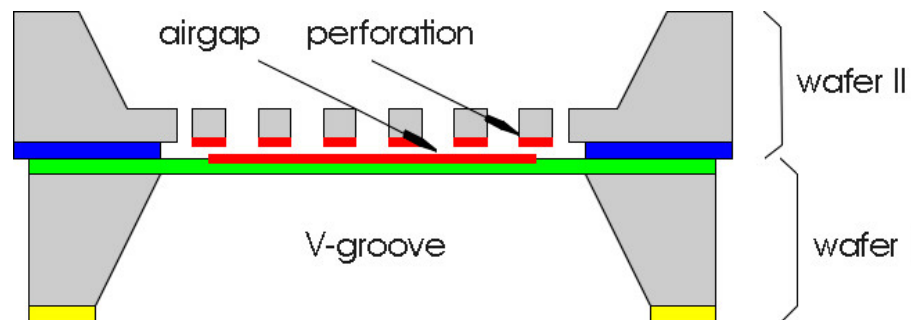
frontside
backside

membrane layer Si-wafer
masking layer



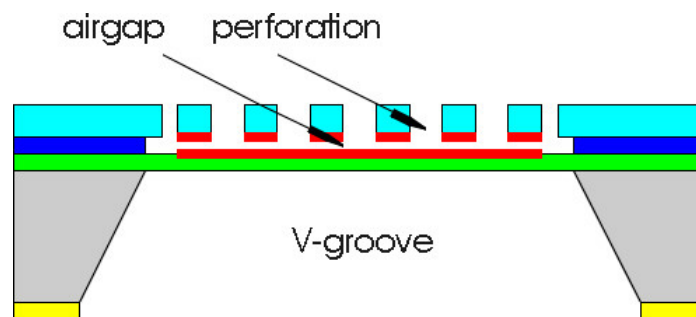
membrane area
V-groove

membrane layer Si-wafer
masking layer



airgap perforation
V-groove wafer I wafer II

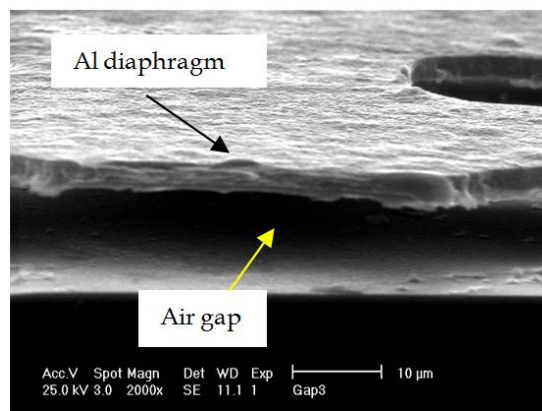
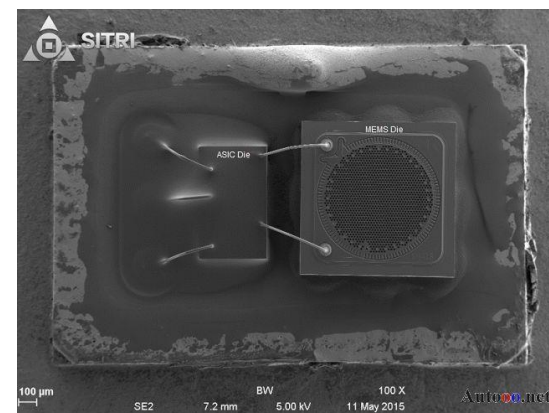
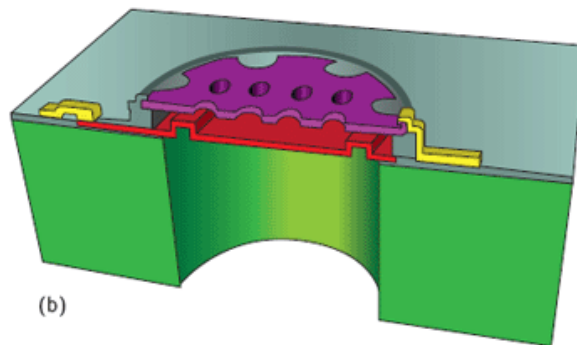
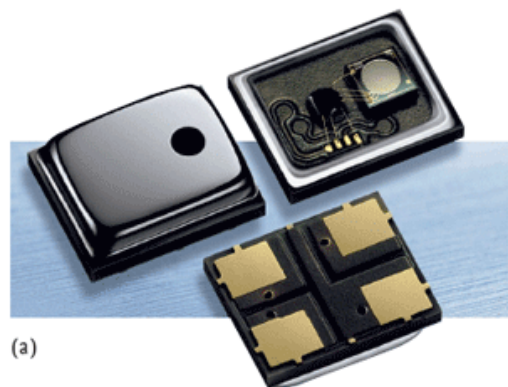
membrane layer Si-wafer spacer
masking layer electrodes



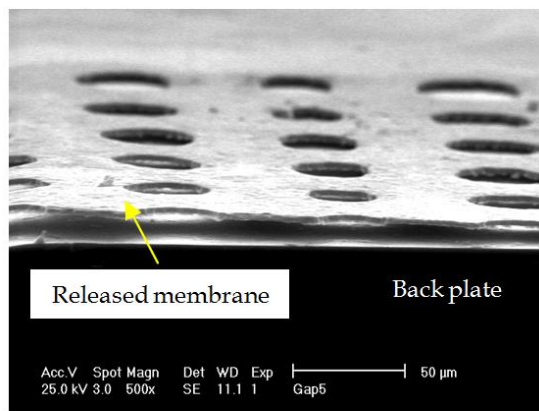
airgap perforation
V-groove

membrane layer Si-wafer electrodes
masking layer spacer rigid backplate

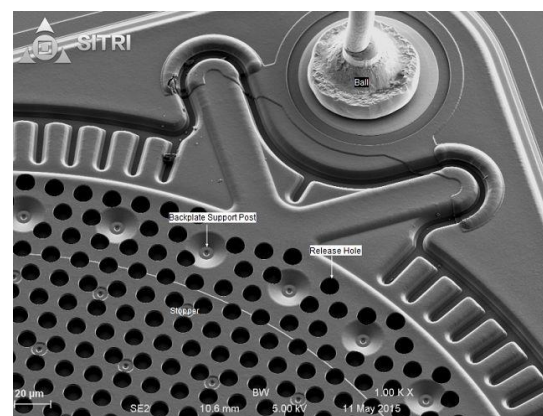
MIKROFON - TÖMBI/FELÜLETI KOMBO



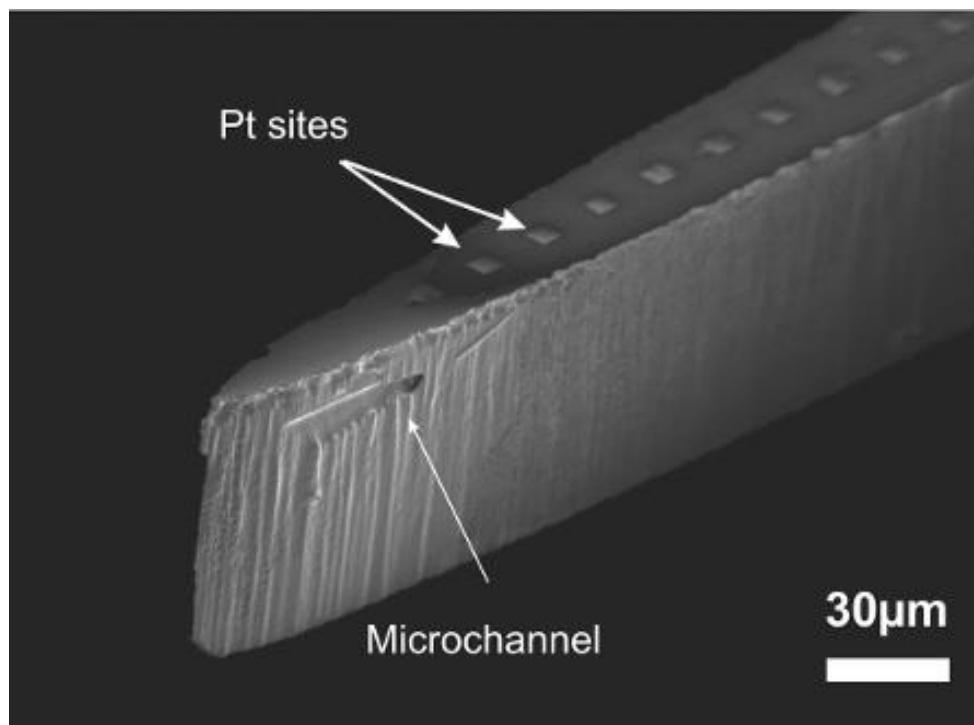
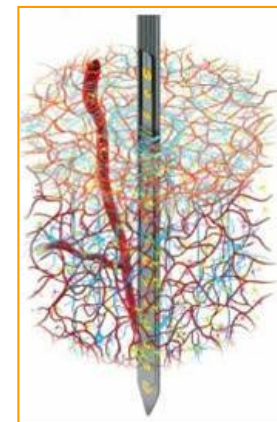
(a) Air gap of microphone



(b) Released membrane structure

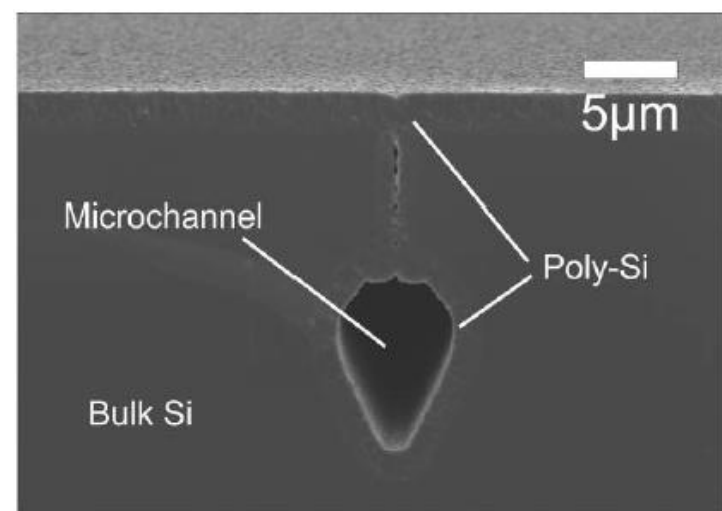
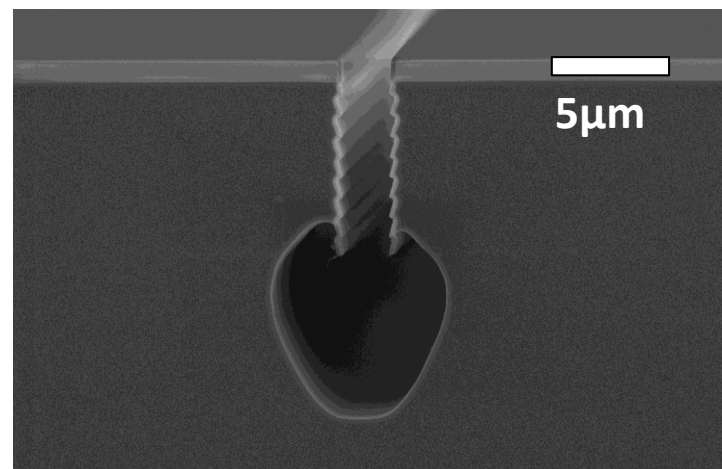
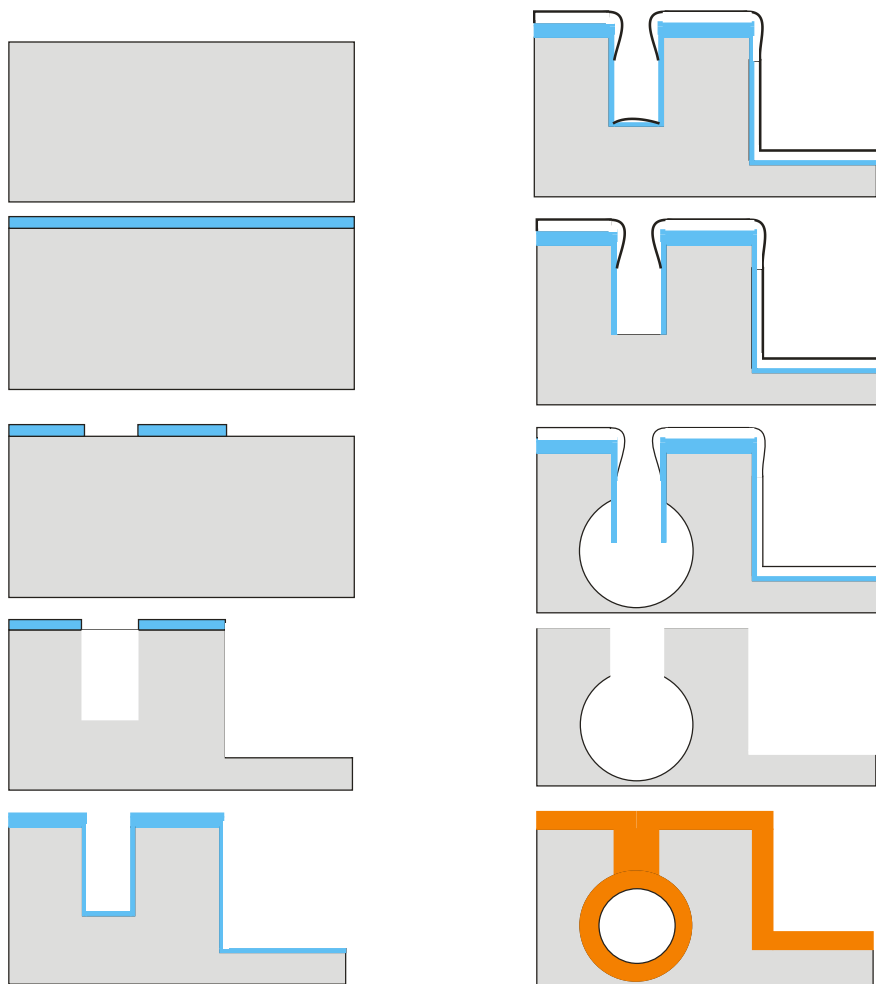


GYÓGYSZERADAGOLÓ CSATORNA SZILÍCIUM NEURÁLIS ELEKTRÓDÁBAN



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

ELTEMETETT MIKROCSATORNA TECHNOLÓGIÁJA



MESTRESÉGES TAPINTÁS

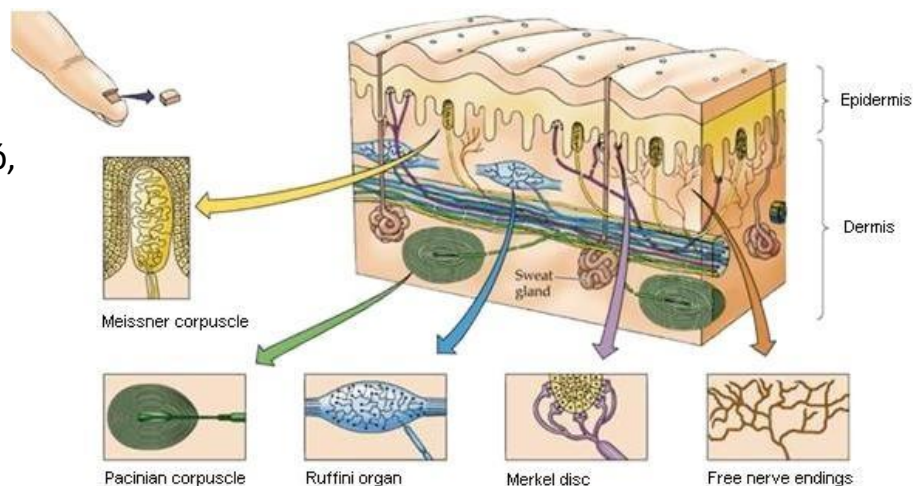
MESTERSÉGES TAPINTÁS

BIOMIMETIKUS ERŐÉRZÉKELÉS

A tapintás analógiája

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

Humán tapintó receptorok



Sensors and Actuators A 179 (2012) 17–31

Contents lists available at 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

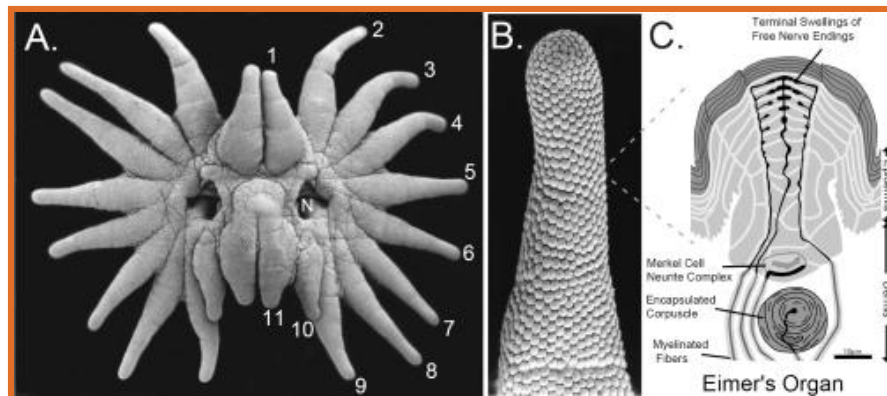
Type	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacini
Number	25%	19%	43%	13%
Adaptivity	Slow	Slow	Fast	Fast
Receptor type	SAI	SAII	FAI	FAII
Field diameter	3–4 mm	>10 mm	3–4 mm	>20 mm
Frequency range	0–30 Hz	0–15 Hz	10–60 Hz	50–1000 Hz
Response to indentation $S(t)$	$S, \frac{dS}{dt}$	S	$\frac{dS}{dt}$	$\frac{d^2S}{dt^2}$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

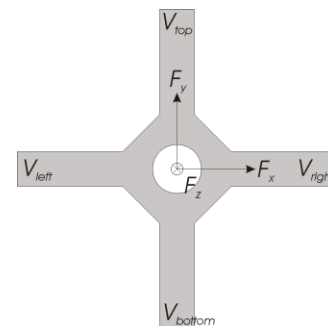
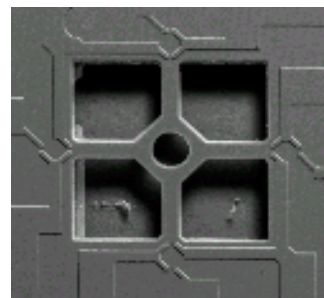


Csillagorrú vakond:
tapintó szem – Eimer szerv



3D PIEZOREZISZTÍV ERŐMÉRŐ

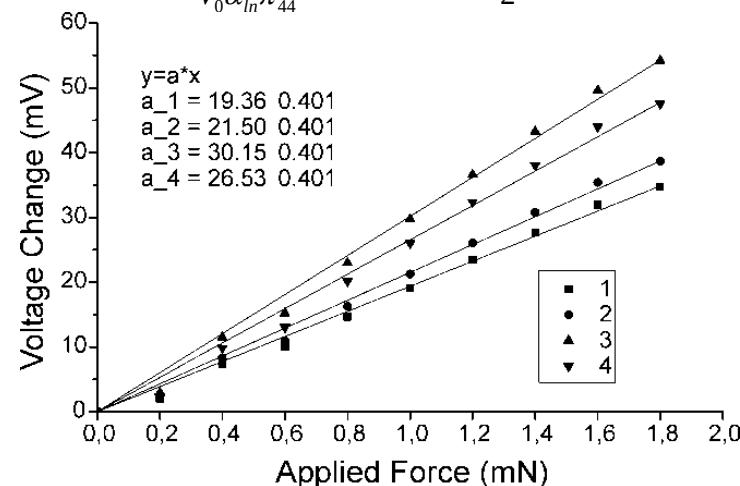
- Egyoldalas Si mikromechanikai megmunkálás
- Piezorezisztív érzékelés
- Lineáris elmélet: a felületi erők és a mért feszültségek között egyszerű összefüggés
- A három erőkomponens egymástól függetlenül mérhető
- Minden érzékelő erővektort (nagyság + irány) mér!
- Érzékenység: 20-30 mV/mN (5V)



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

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

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



3D PIEZOREZISZTÍV ERŐMÉRŐ

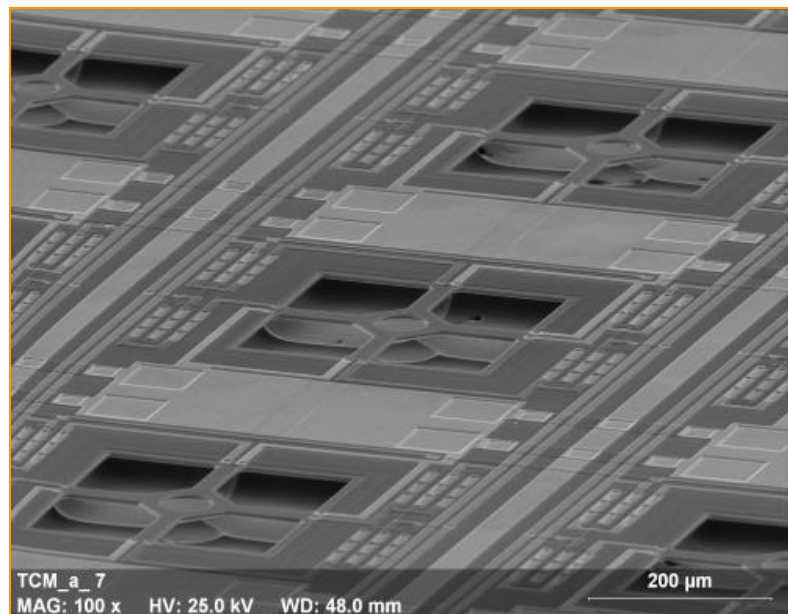
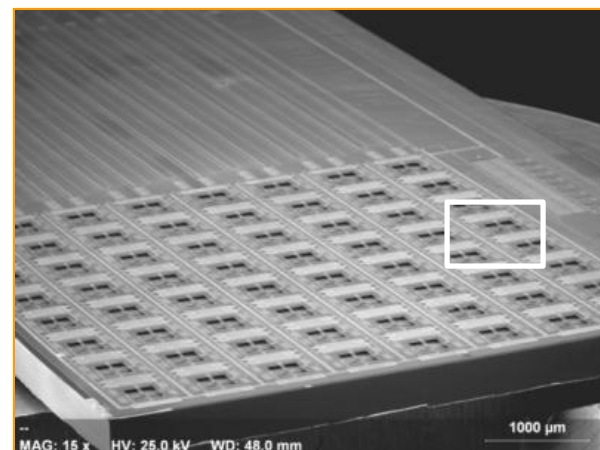
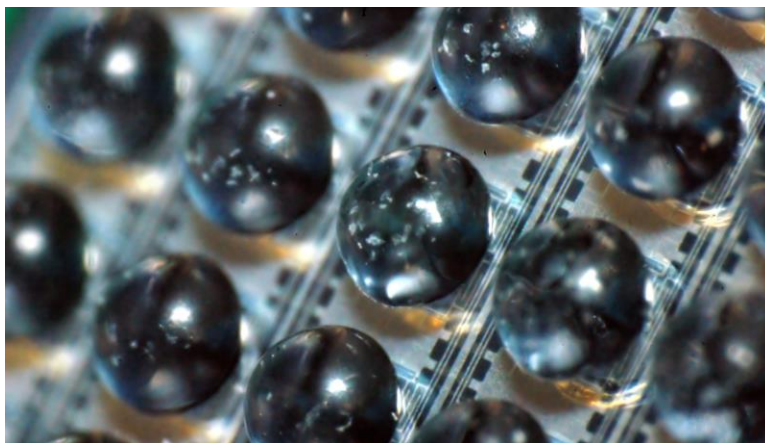
3D erőterkép 2D felületen

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

INTEGRÁLT KIOLVASÓ ELEKTRONIKA

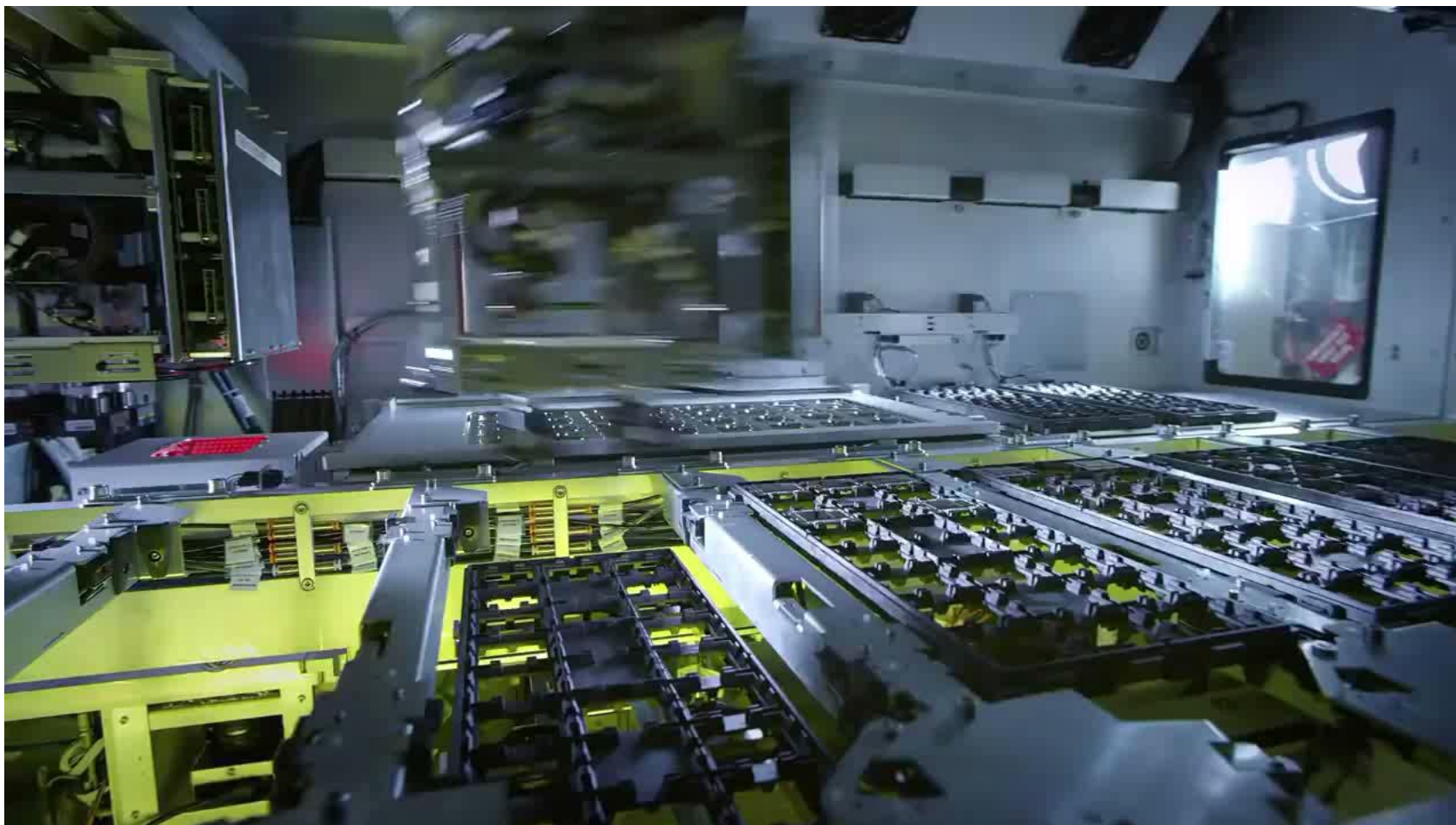
Pórusos Si mikromechanika és CMOS technológia

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



INTRO MTA EK MFA

INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – INTEL



INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – MTA EK



MEMS labor:

300+150 m² 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, Canon FIB nanoprocessing system

SEM és fókuszált ionnyaláb (FIB),

Gáz injektáló rendszer (GIS) (EBAD, IBAD)

és Energia Diszperzív Spektroszkóp (EDS)