



Mikromechanikai technológiák

Fürjes Péter

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



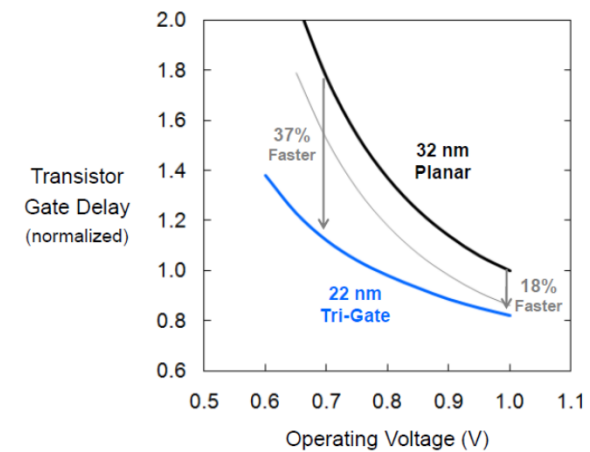
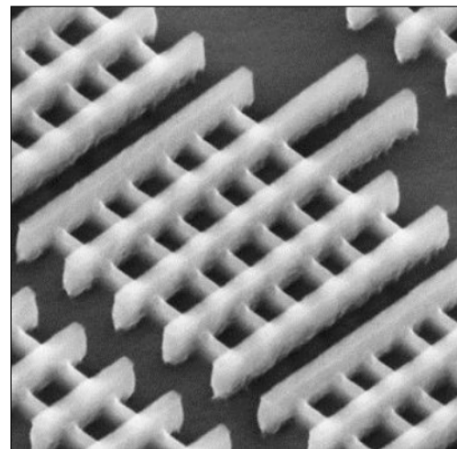
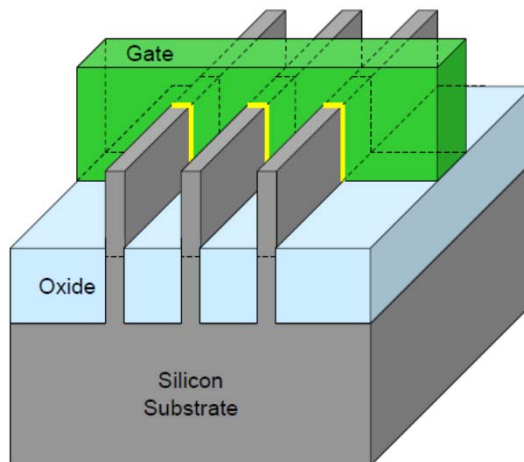
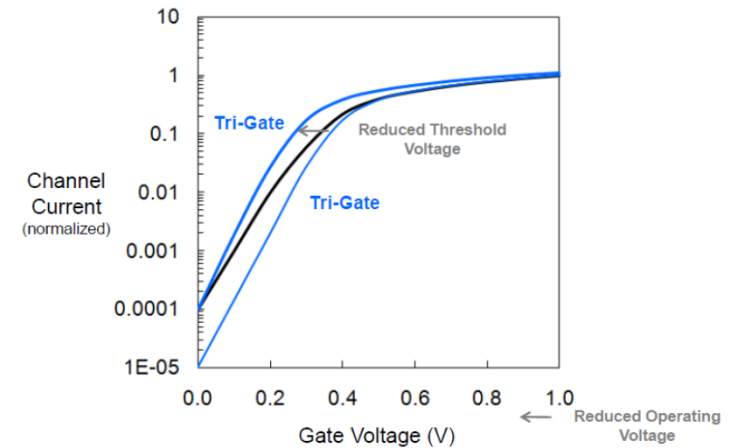
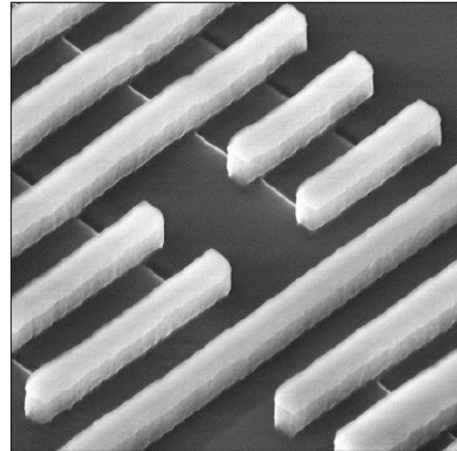
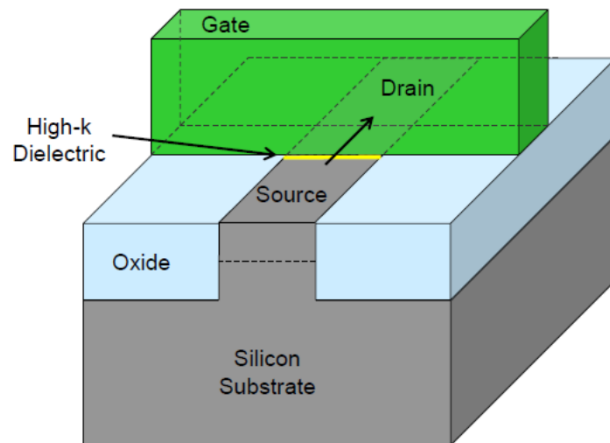
Ismétlés

- 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.

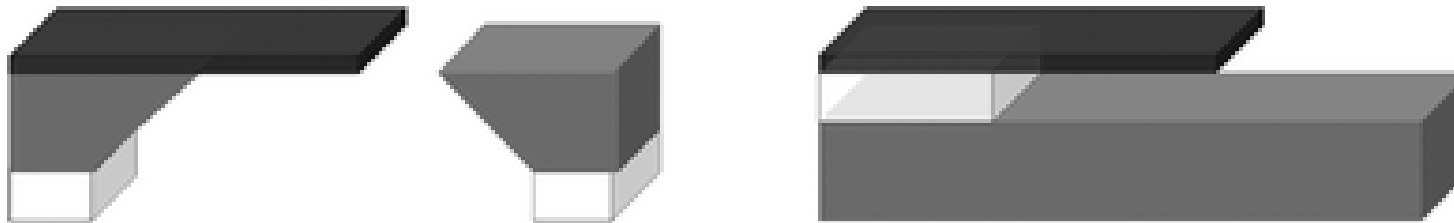
Mikromegmunkálás:

- 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

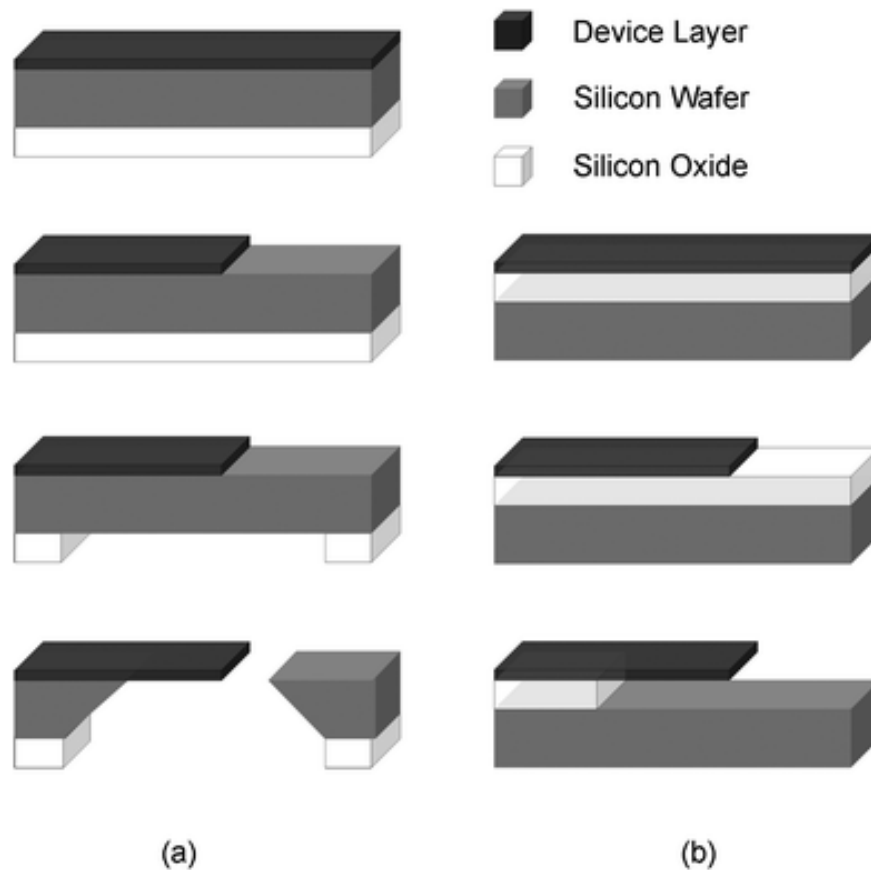
Tömbi vs. felületi mikromechanika



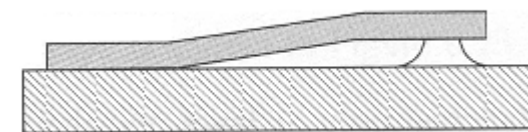
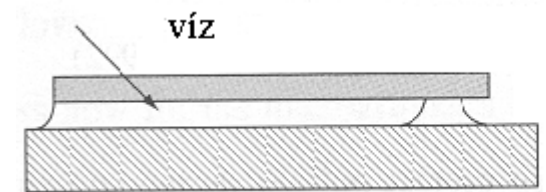
	Tömbi	Felületi
<i>Mérettartományok</i>	$2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$	$a < 2-3 \mu\text{m}$
<i>Termikus szigetelés</i>	+	-
<i>Mechanikai stabilitás</i>	+	-
<i>Membránok?</i>	egykristály	amorf v. polikristályos

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

Tömbi vs. felületi mikromechanika

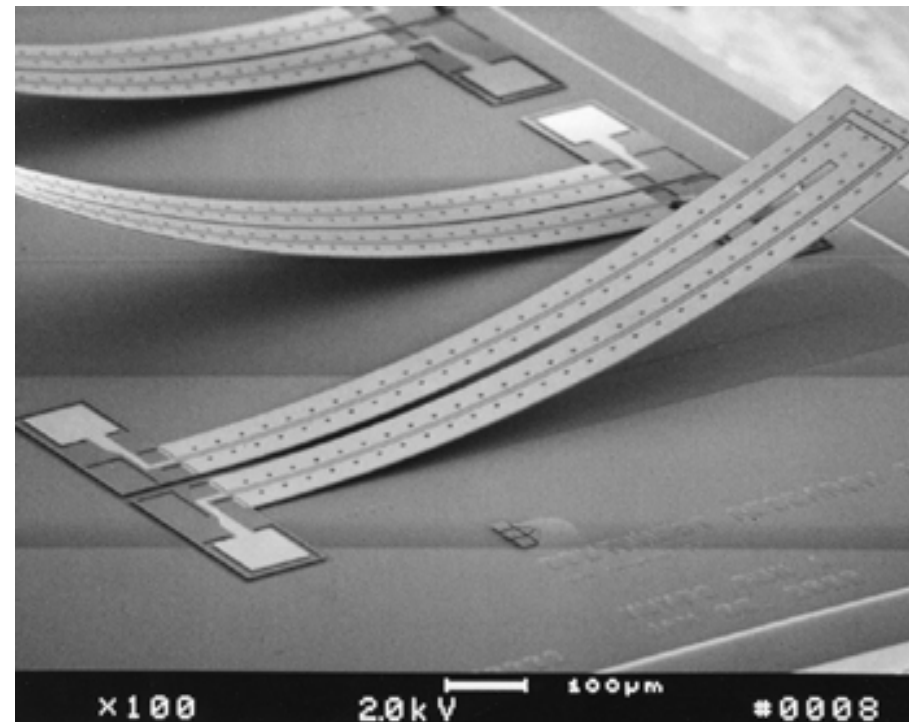
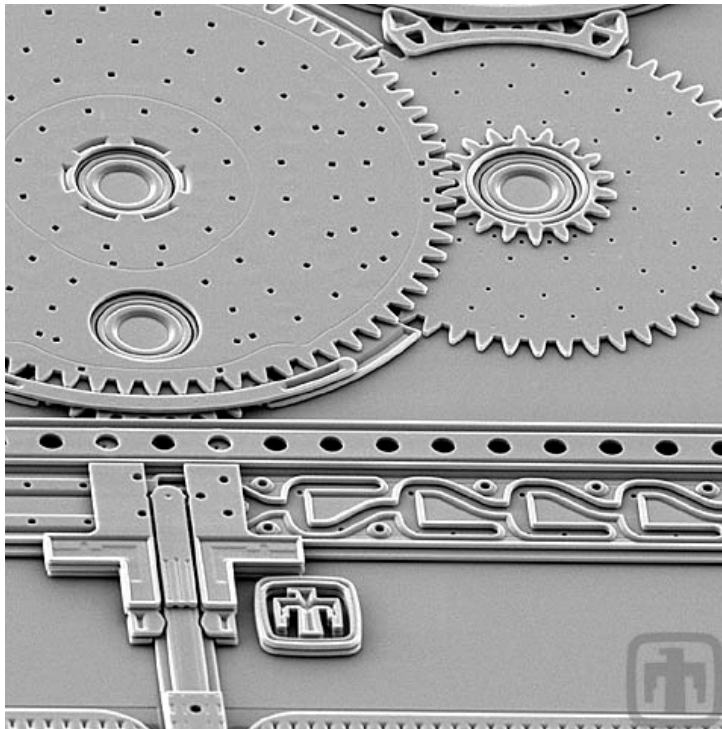


Jellegzetes hiba: letapadás

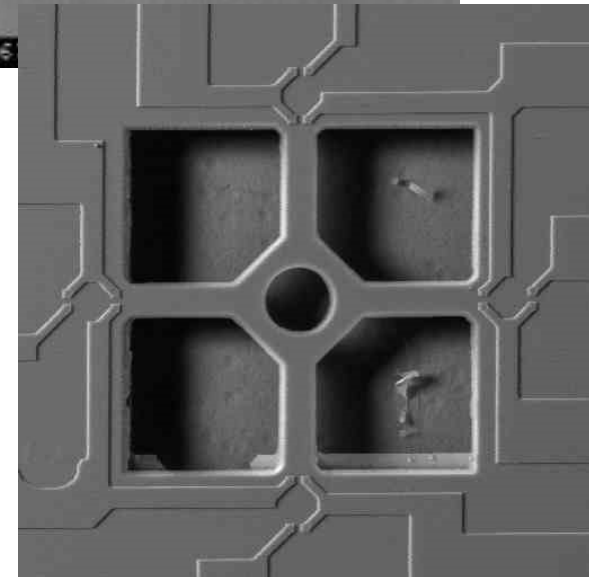
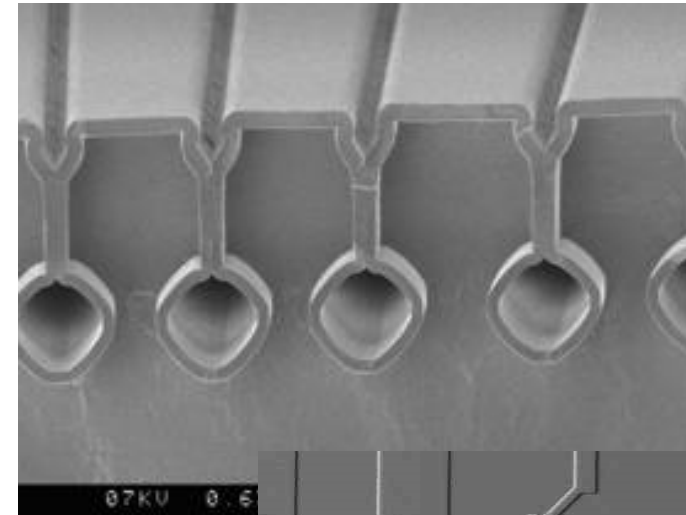
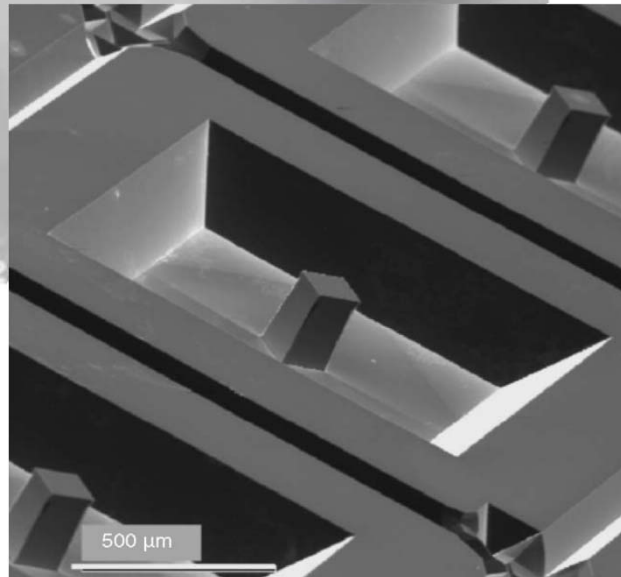
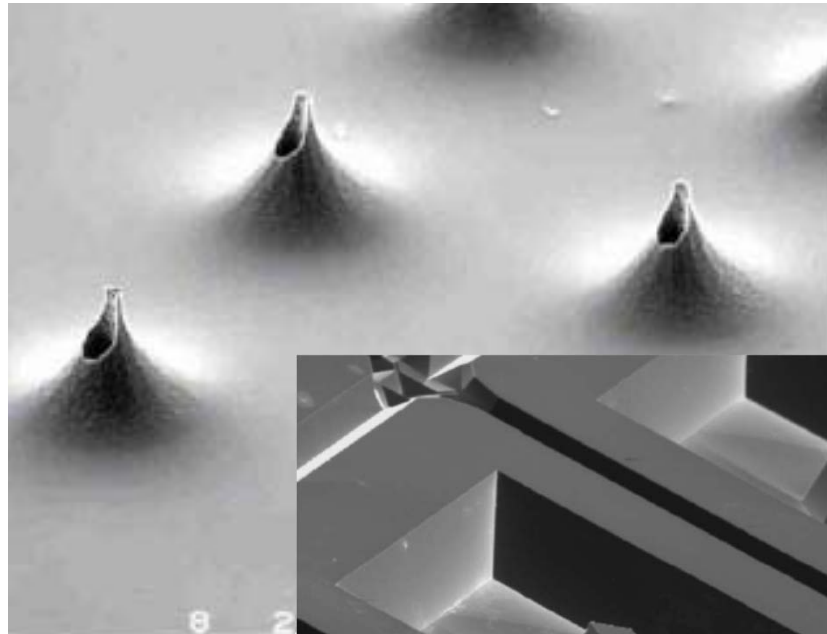


Megoldás:
beépített ütköző
vagy perforált alakzatok
vagy száraz marások

Példák felületi mikromechanikára



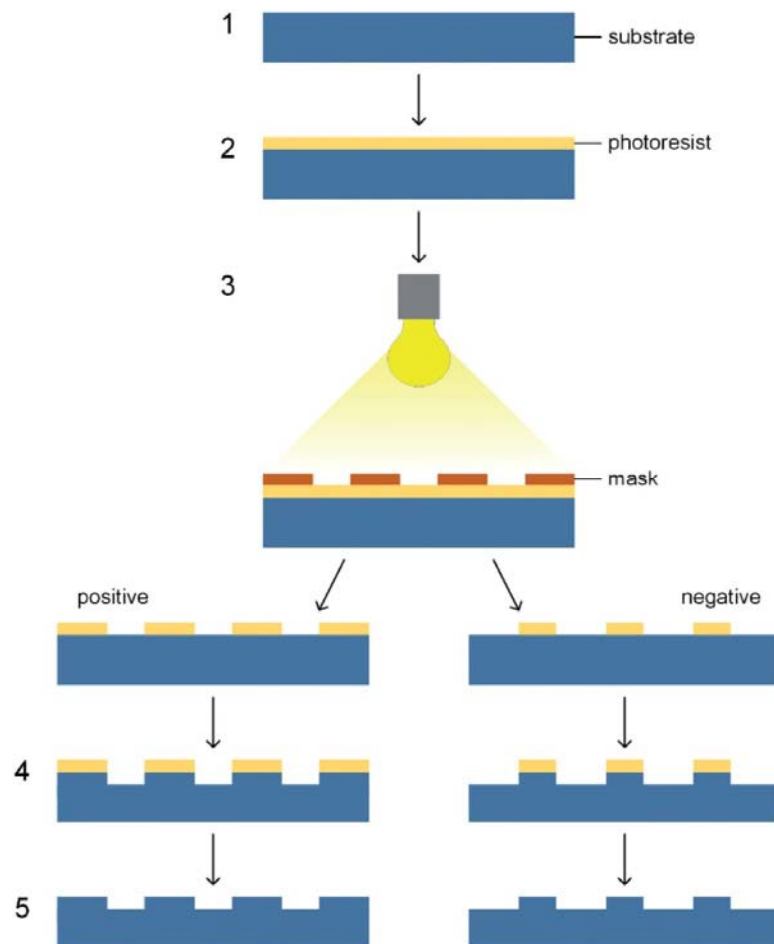
Tömbi mikromechanika



LITOGRÁFIA

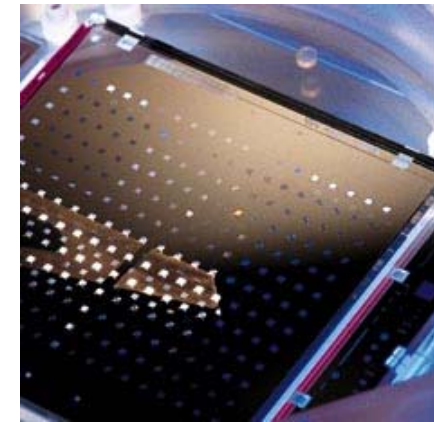


FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



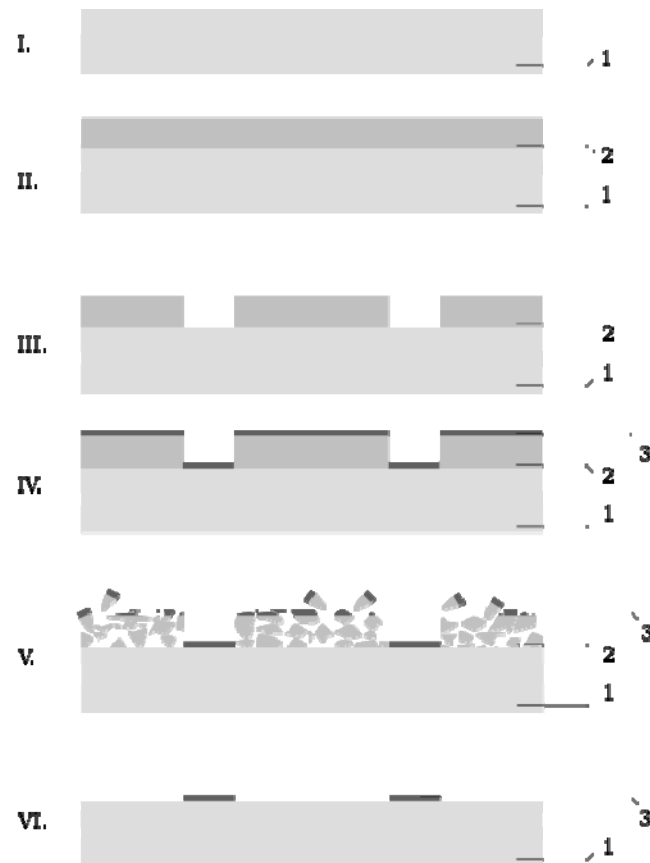
1. Megmunkálandó felület előkészítése
2. Lakkfelvitel / lakkszáritás
3. Exponálás / előhívás

Exponálást követő
hőkezelés /
keményítés



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

FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR – LIFT-OFF



1. Megmunkálandó felület előkészítése

2. Lakkfelvitel / lakkszáritás

3. Exponálás / előhívás

Exponálást követő hőkezelés

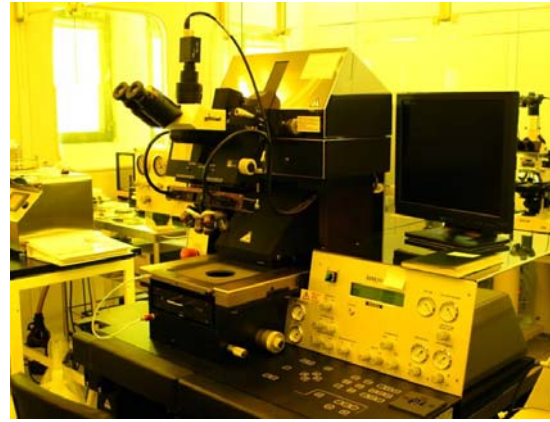
4. Rétegleválasztás

5. Lakkeltávolítás, tisztítás

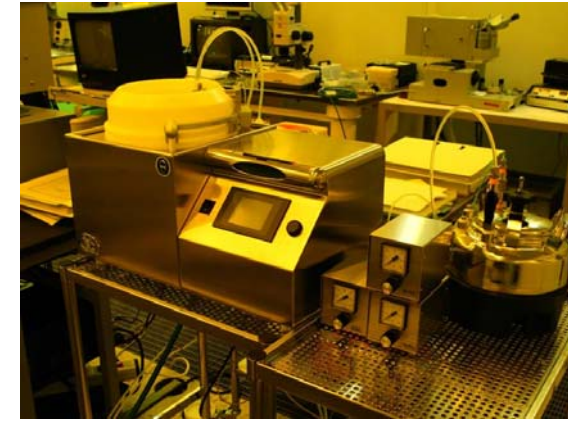
FOTOLITOGRÁFIAI MŰVELETSOR



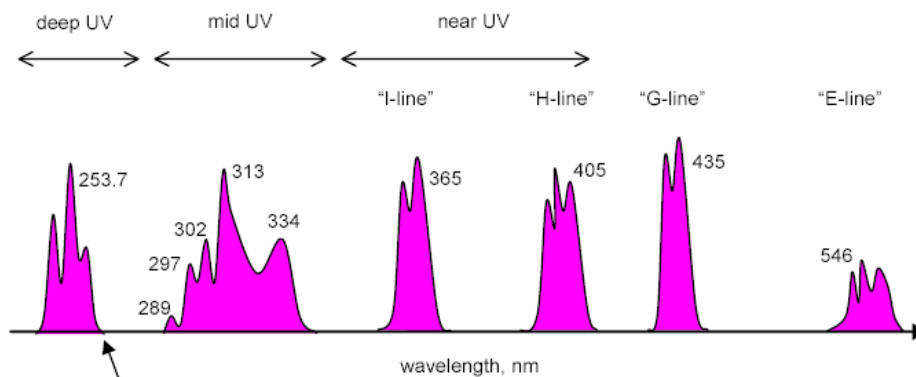
Lakkcentrifuga – hotplate



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

RÉTEGLEVÁLASZTÁS

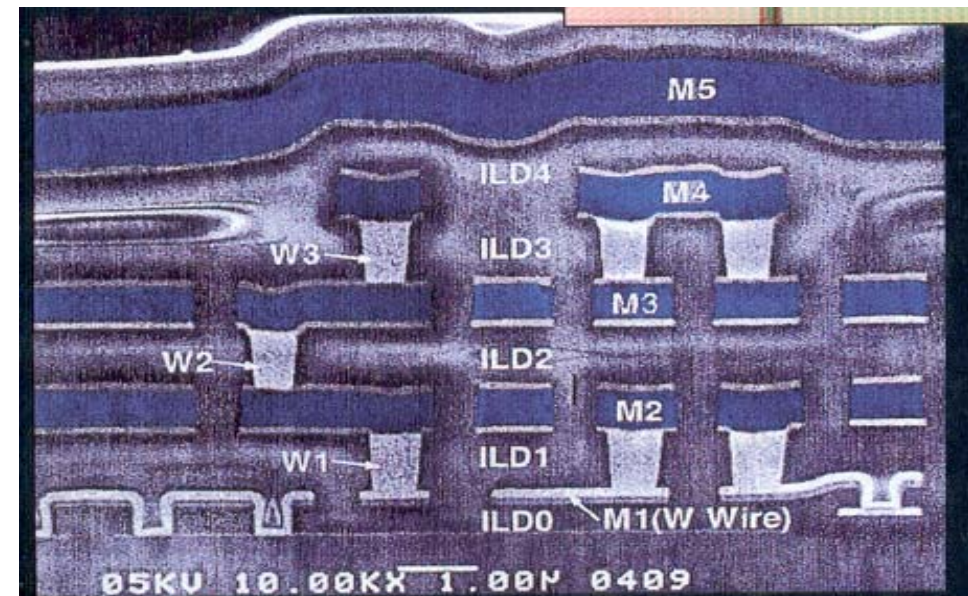


Vékonyrétegek - felhasználás

- 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...)

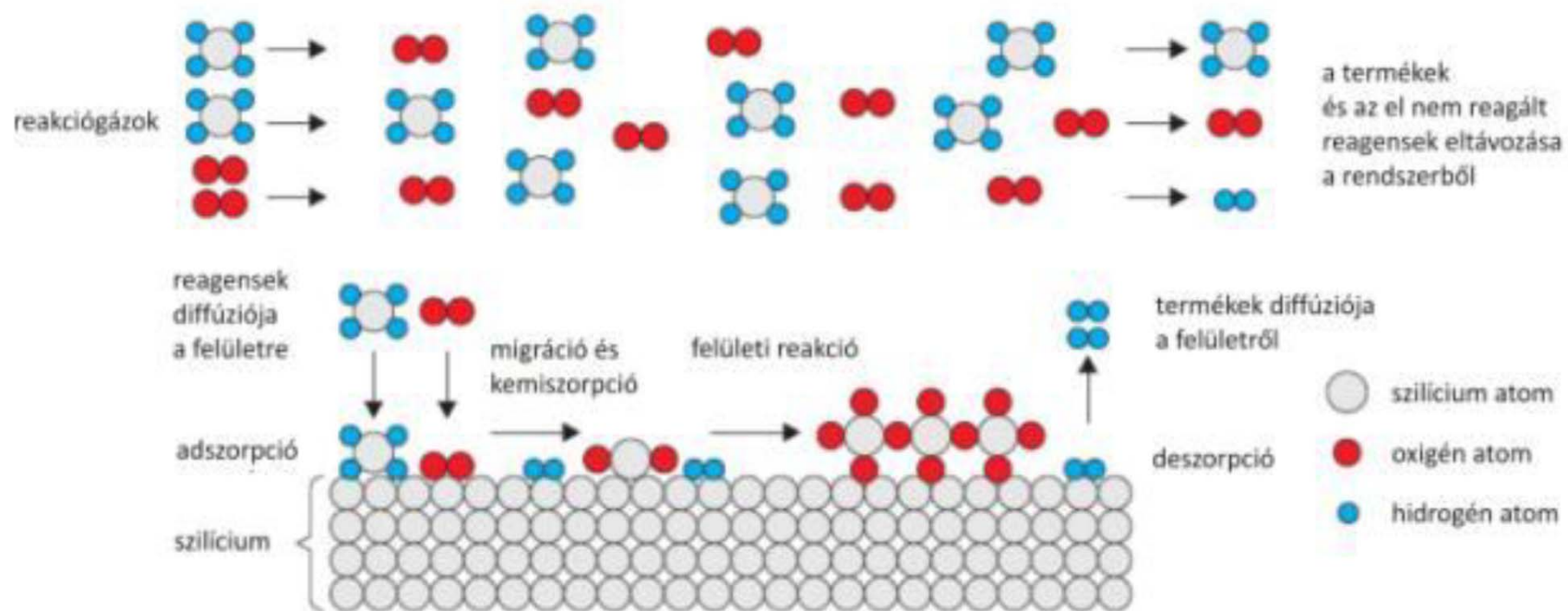
MWCVD (MicroWave...)

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

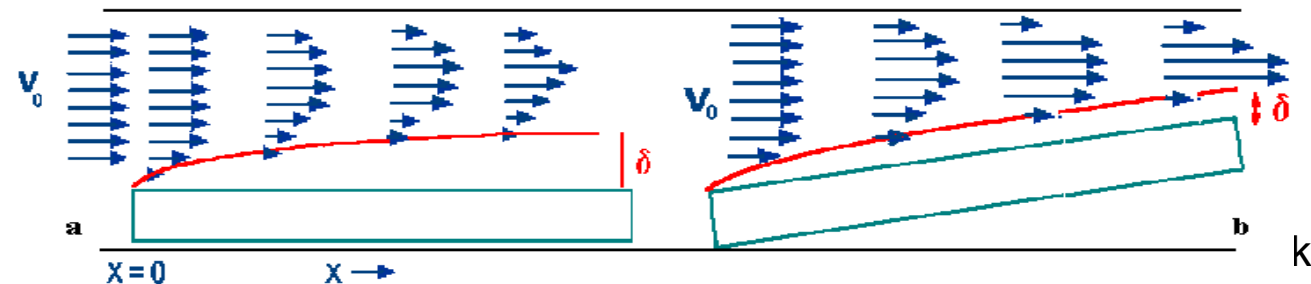


Atmoszférikus CVD - APCVD

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

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

μ kinematikai
viszkozitás
 ρ a sűrűség

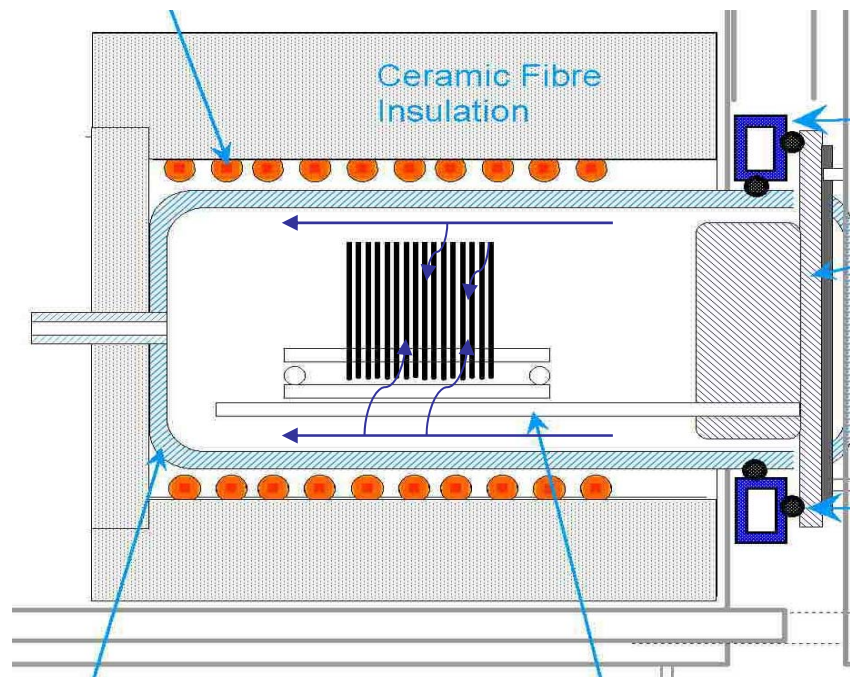


egyenletesség $\pm 10\%$, főleg egyszeletes reaktorok

- SiO_2 : szilán és oxigén / 450oC

Alacsony nyomású CVD - LPCVD

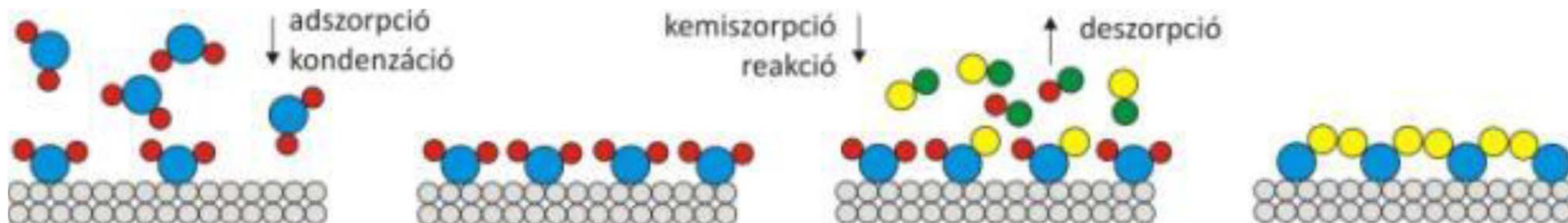
- Nagy szabadúthossz
- Sebességmeghatározó: kémiai reakció
- Termikus / plazma aktiváció



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

ALD – atomi réteg leválasztás

- Sebességmeghatározó: kemisorpció
- Termikus / plazma aktiváció

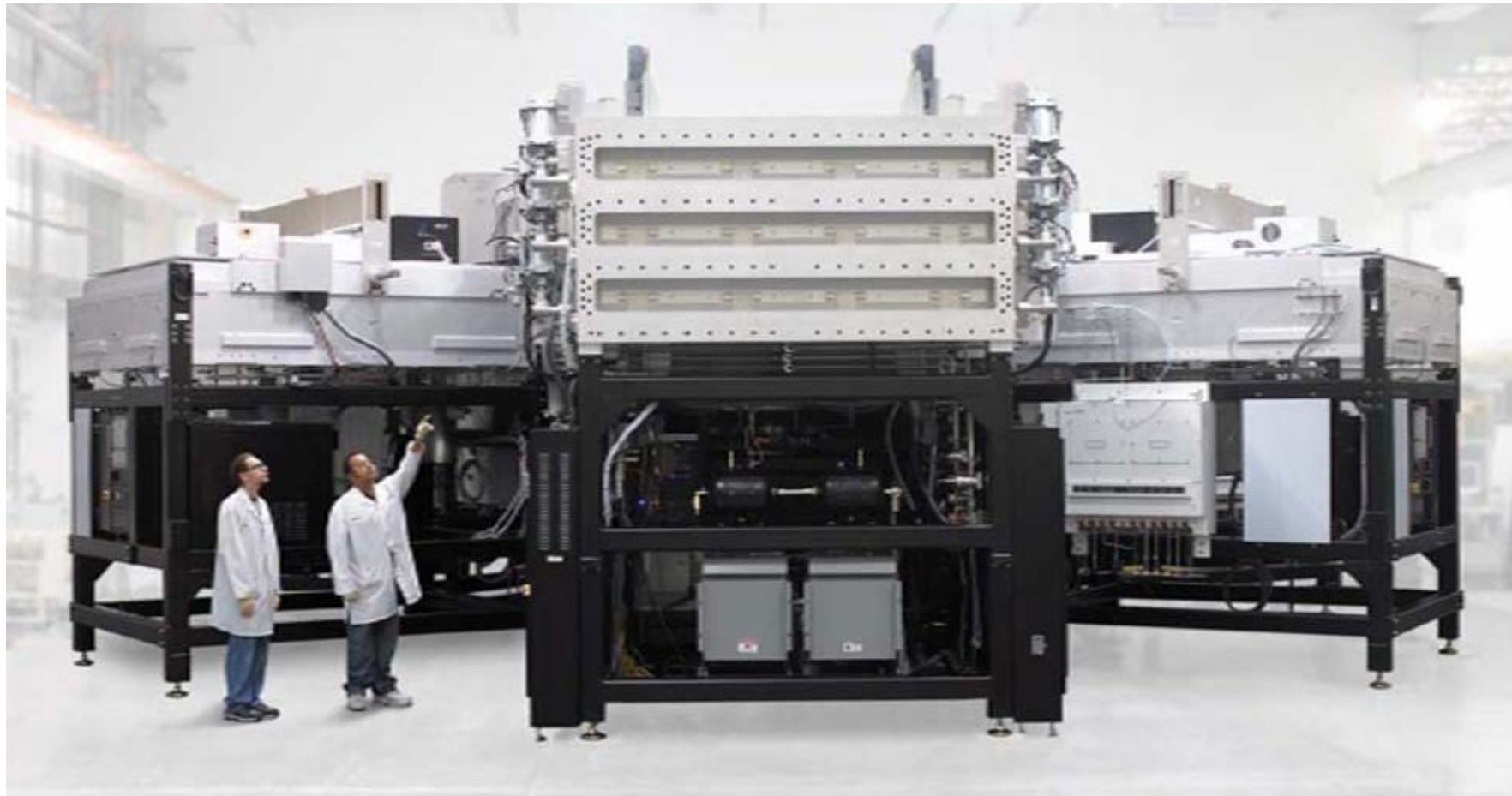


- atomi pontosság
- nagy homogenitás
- kiváló lépcsőfedés
- batch és egyszeletes reaktorok

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



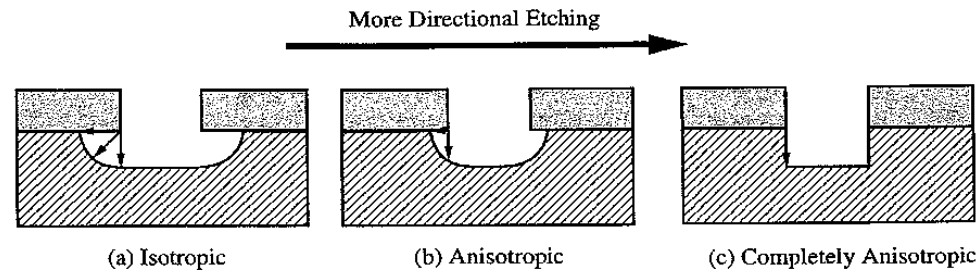
Vékonyrétegek – technológiák



MARÁSOK



Marások szerepe a mikrotechnológiában



Cél:

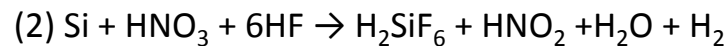
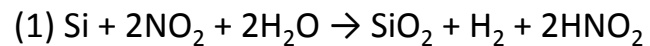
3D struktúra kialakítása

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

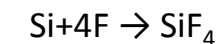
Si nedves kémiai marása: $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ elegyében



Száraz marás

- Gáz fázisú marószerből plazma
- Kémiai és fizikai folyamat

Si száraz marása: halogén alapú plazmákban

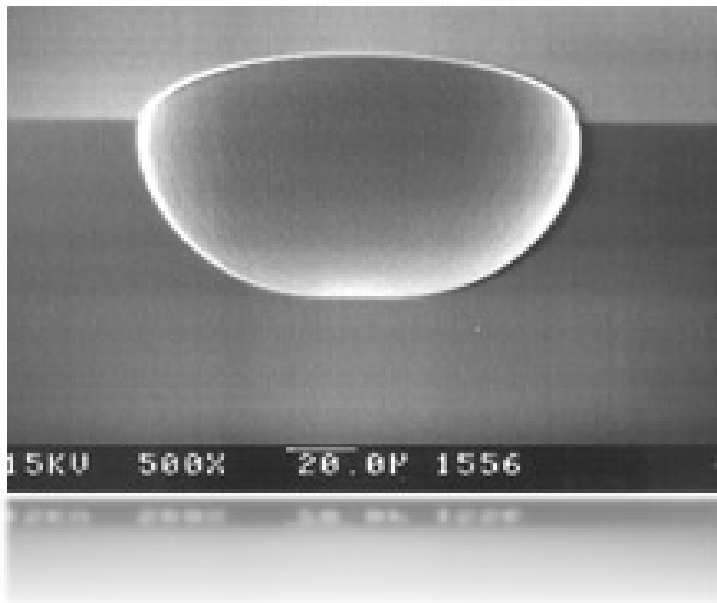


Nedves kémiai marások

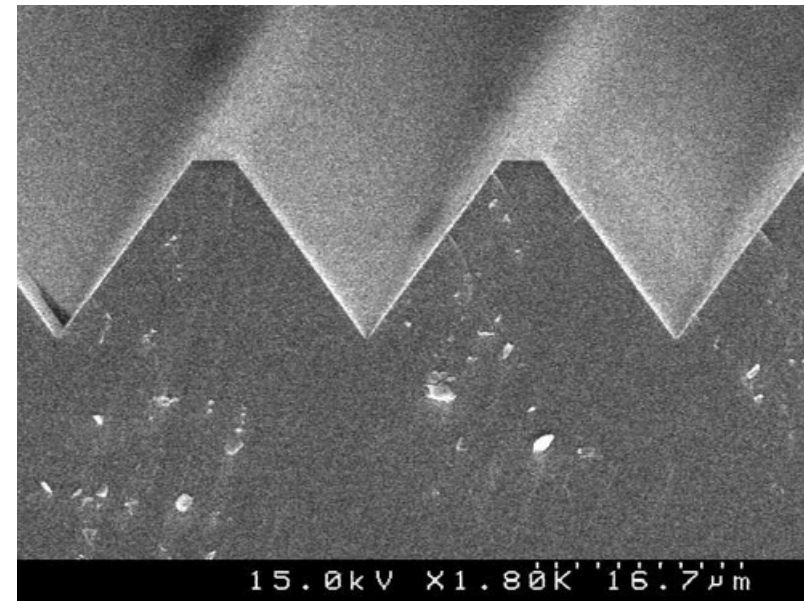
A marási eljárásokkal szemben támasztott követelmények:

- 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 ($\approx 0,1-1 \mu\text{m/perc}$)
- lehetőleg kémiai reakció kontrollált legyen (nem transzportfolyamat által)

Szilícium marása

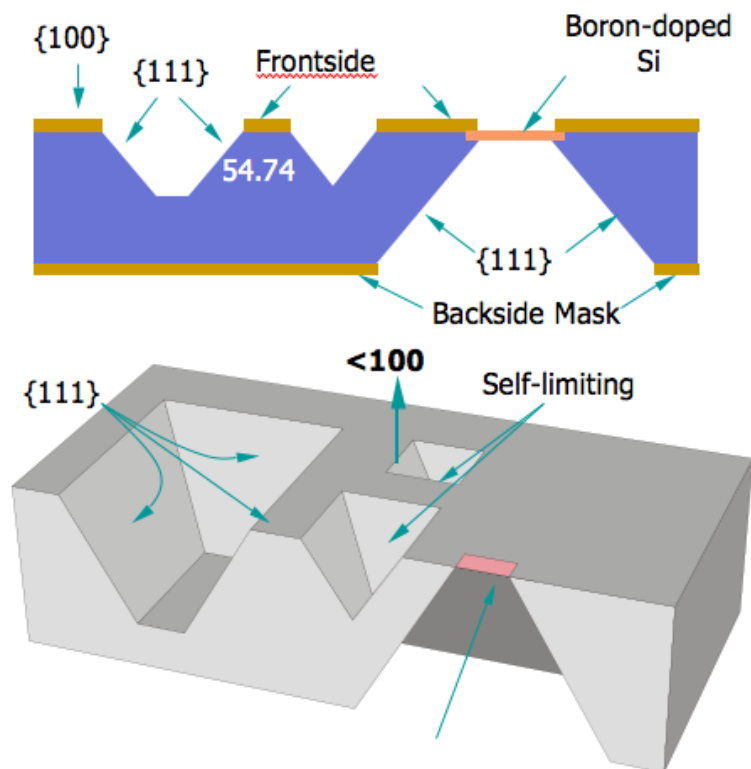


Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség (pl. poli-maró - HF-HNO_3 - CH_3COOH)

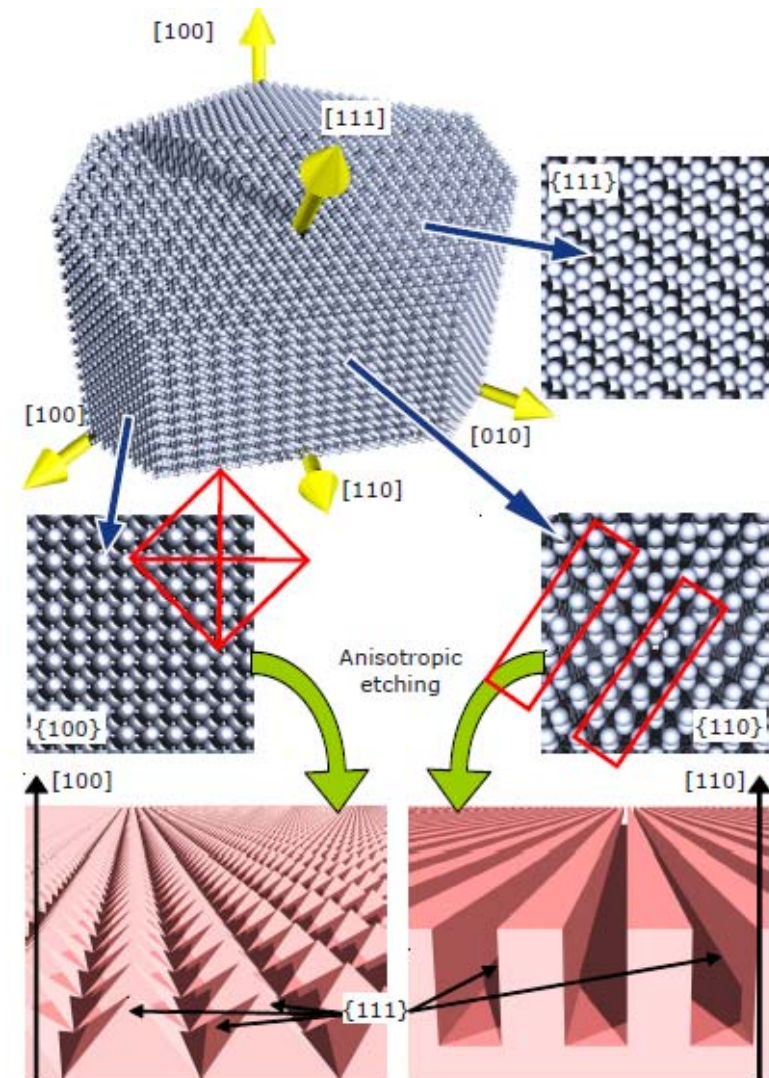


Anizotróp: a különböző kristálytani irányokban más és más a marási sebesség (pl. lúgos maró – KOH)

Szilícium marása KOH marószerben



Szelettípus és orientáció is számít!



Száraz marások

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

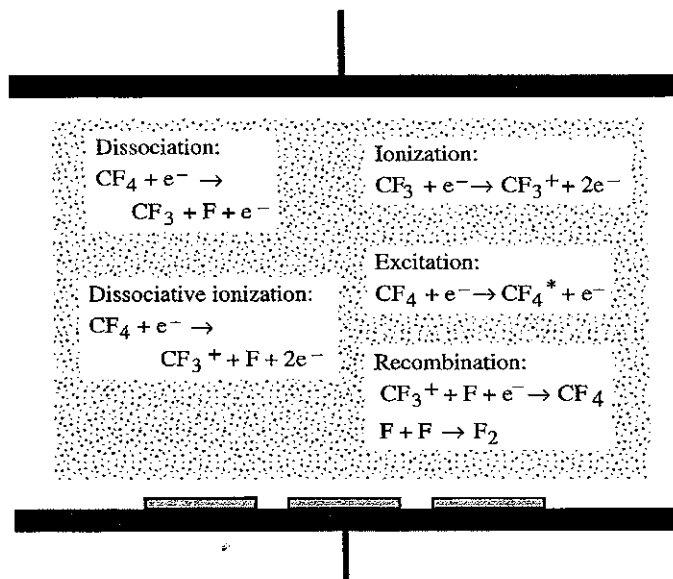


Figure 10-9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

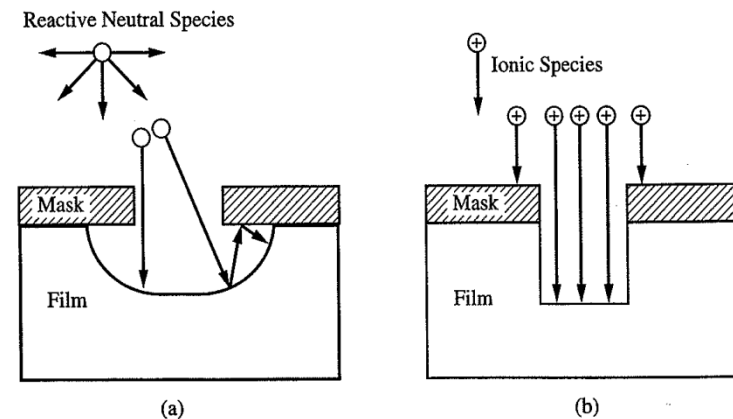


Figure 10-11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient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

Plazma maró berendezések

HDPE - High Density Plasma Etching

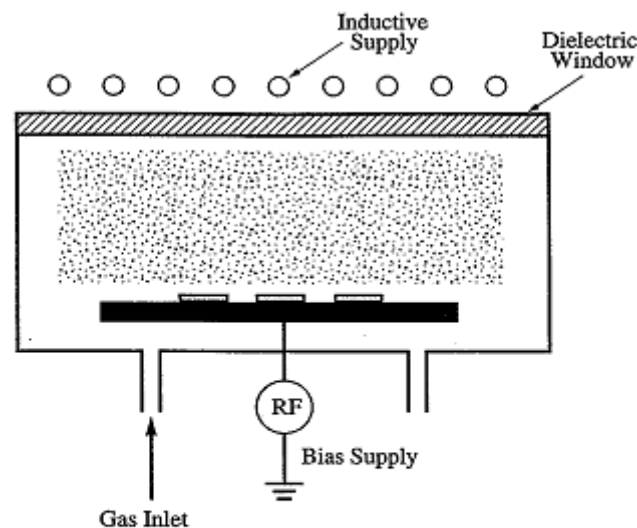


Figure 10-16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **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

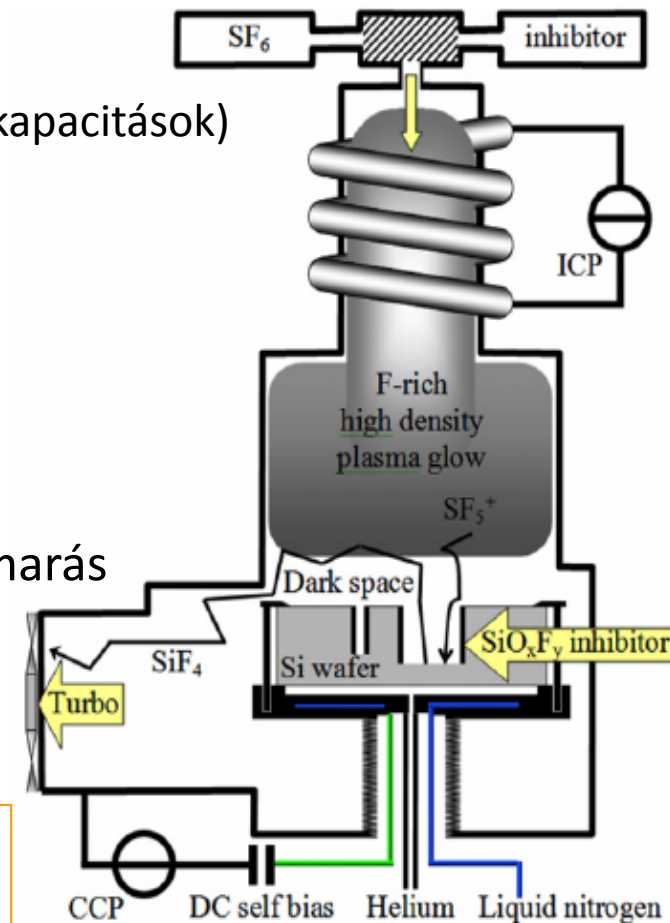
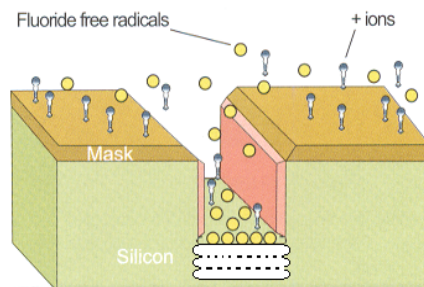
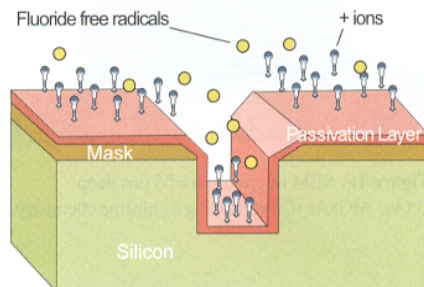
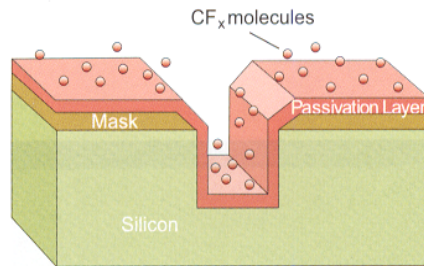
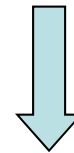


Figure 1. A dual source DRIE system.

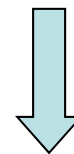
DRIE – Bosch Process



- 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



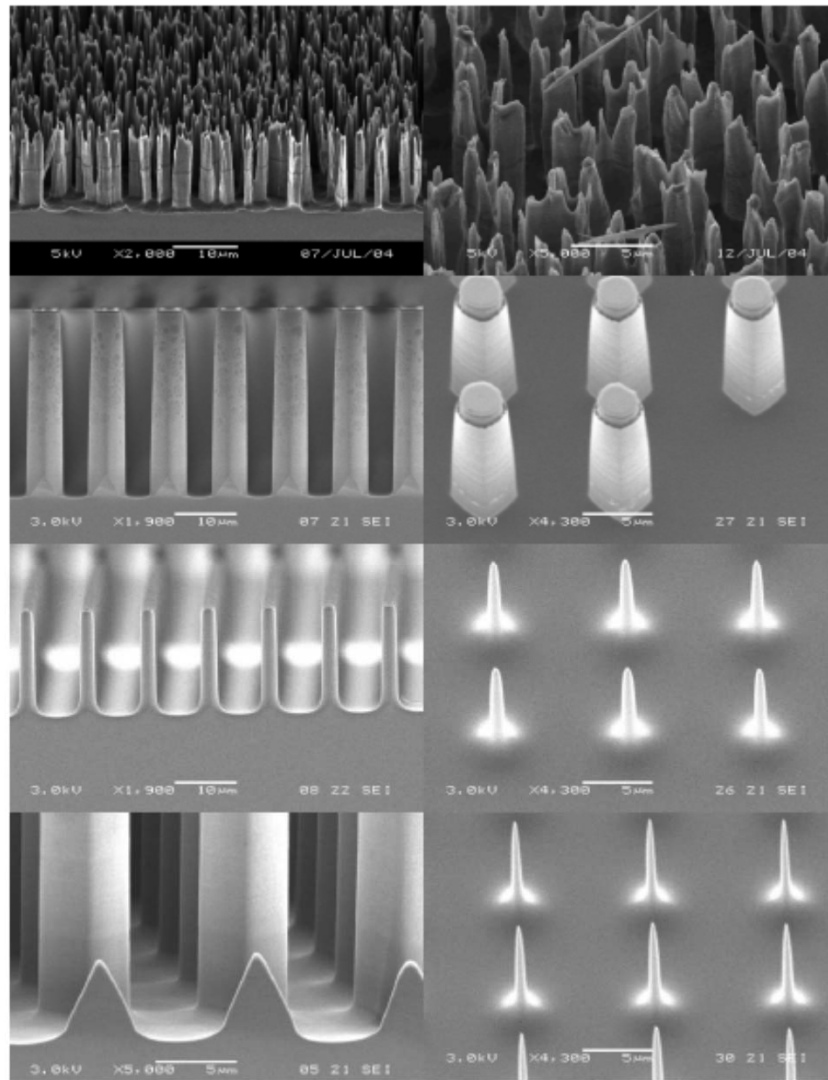


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

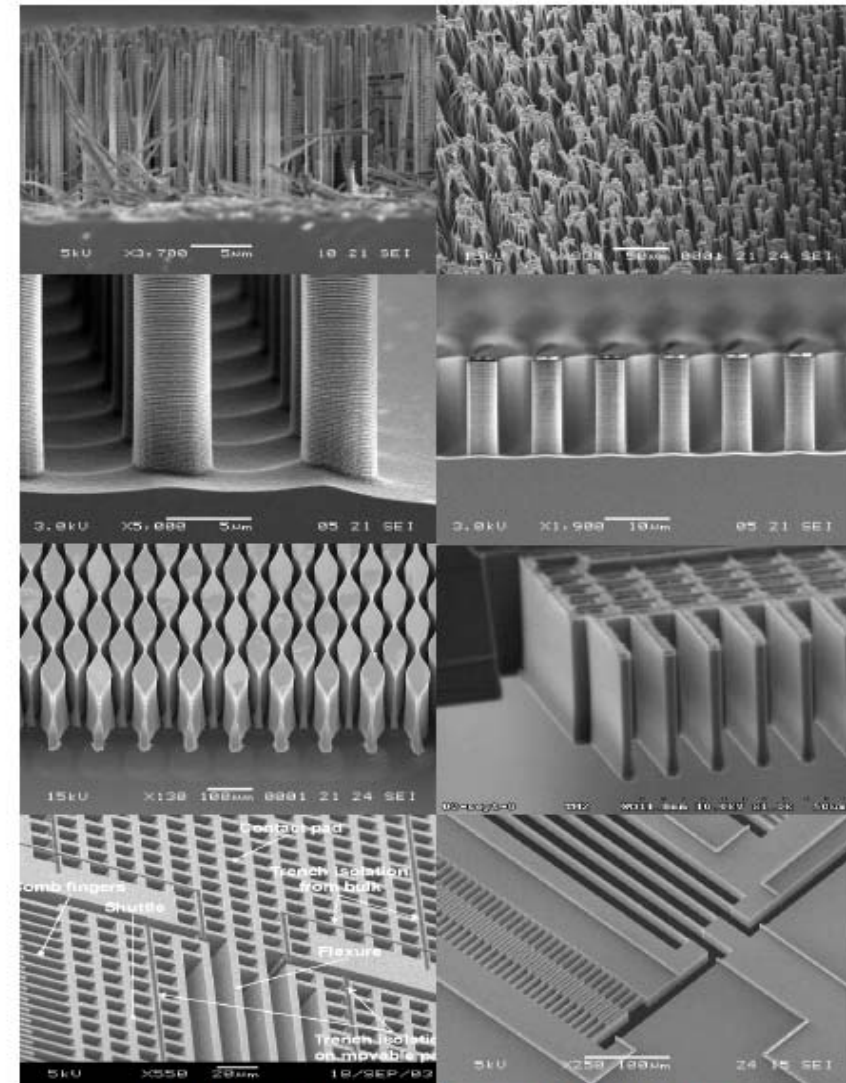


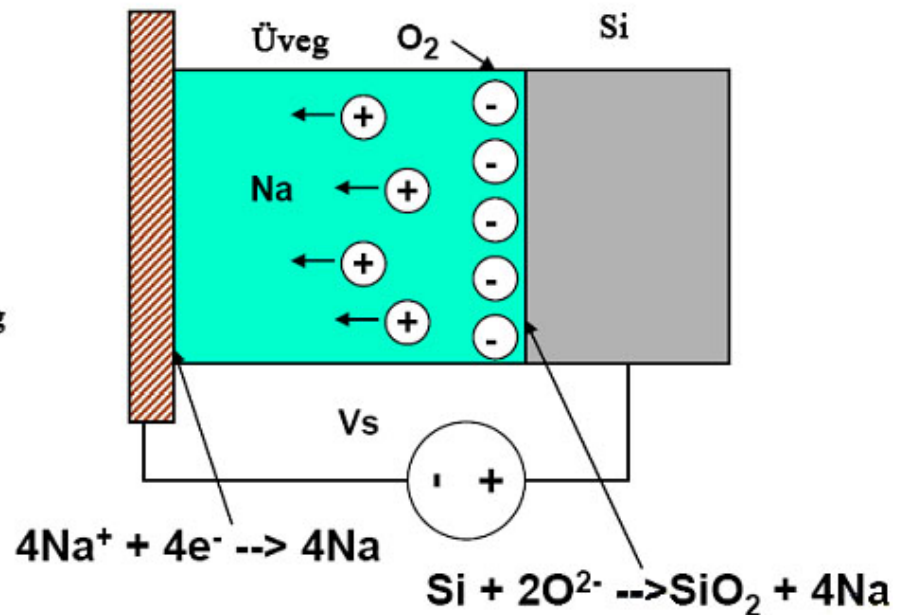
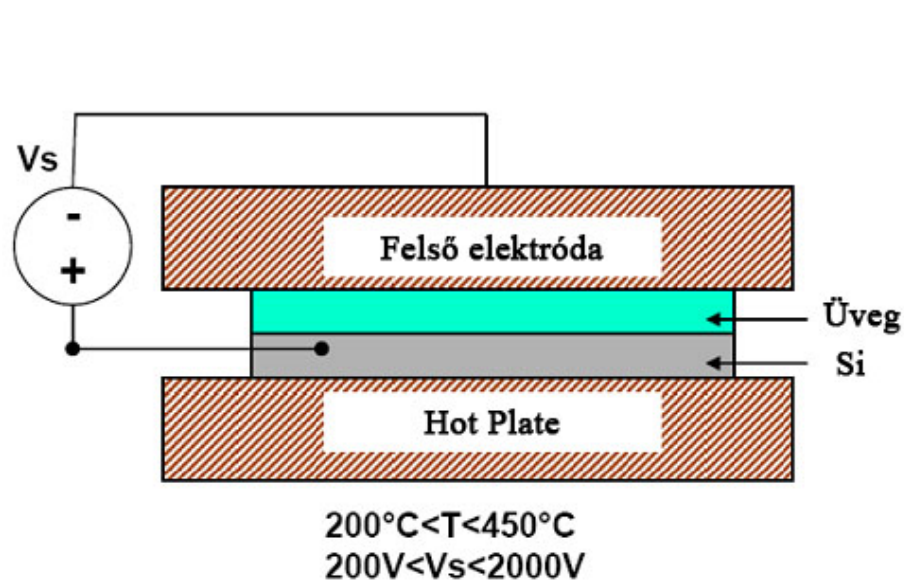
Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).

SZELETKÖTÉS



Anódos szeletkötés

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



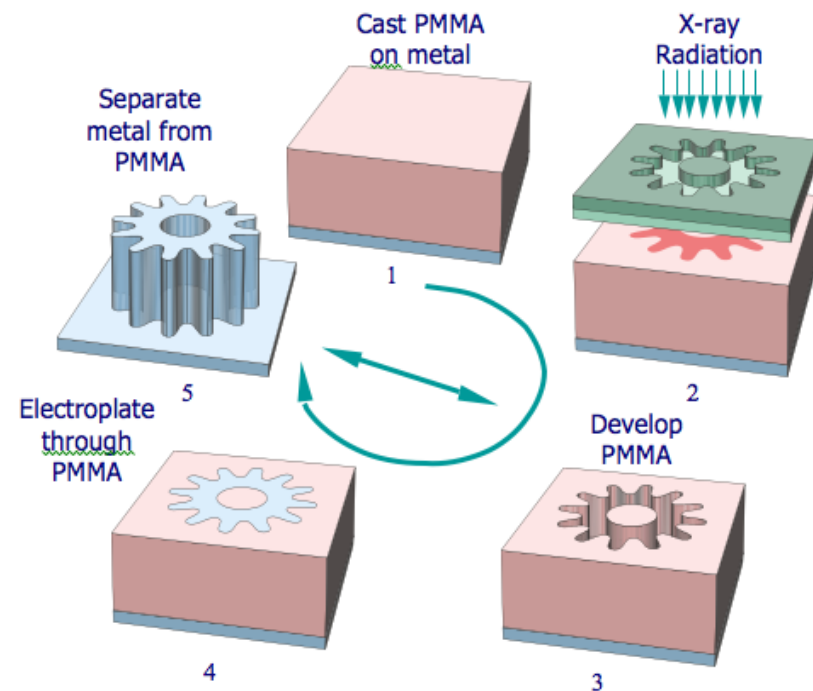
LIGA



LIGA (KIT)

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

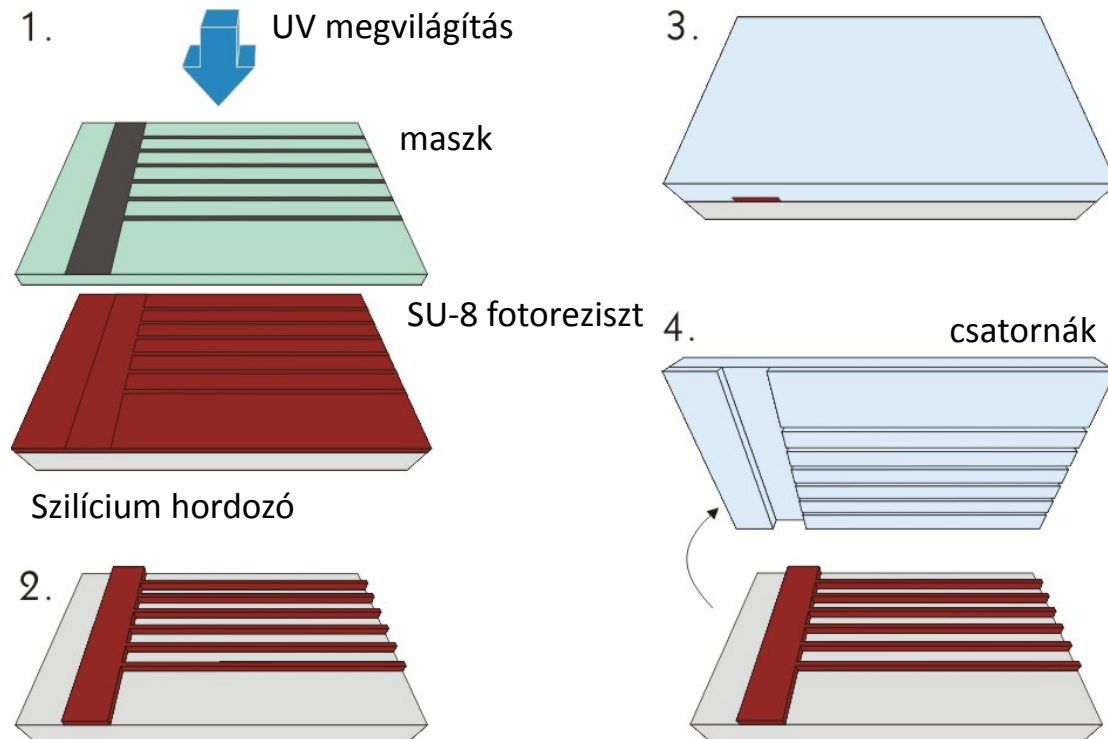
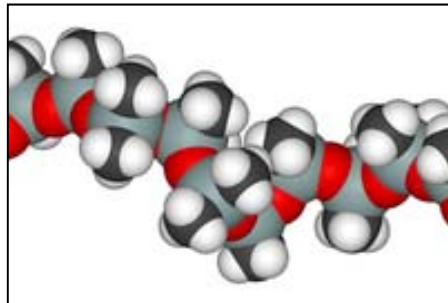
- Nagy oldalarányú mikroszerkezetek kialakítása (100:1)
- Merőleges oldalfalak, 10nm felületi érdességgel (optikai elemek)
- Magasság: 10mikrontól néhány mm-ig
- X-ray LIGA (PMMA) / UV LIGA (SU-8)



SOFT LITO



Mikrofluidika kialakítása PDMS polimerben

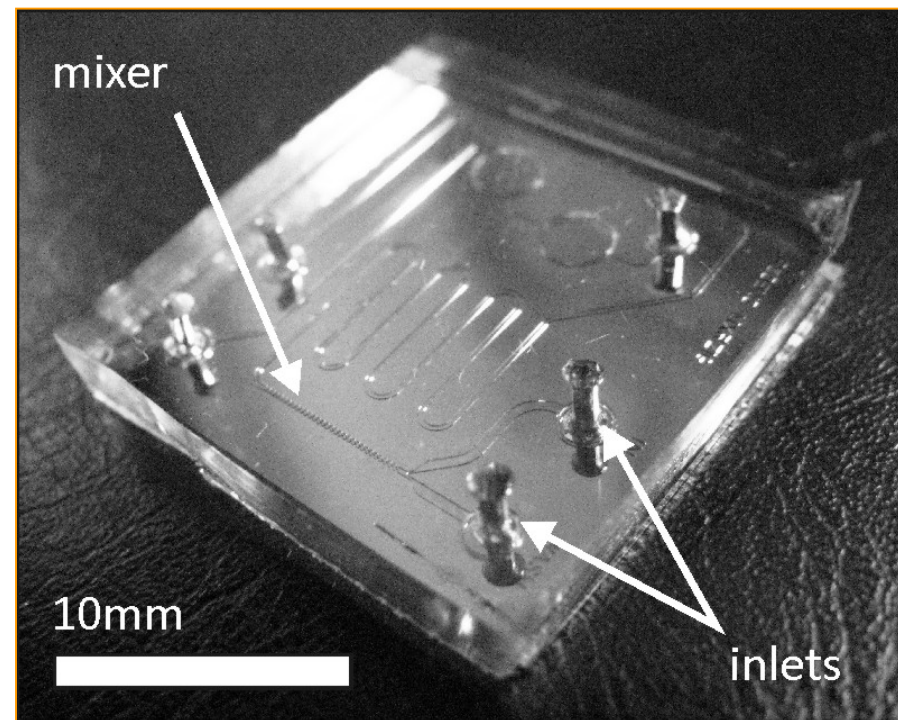
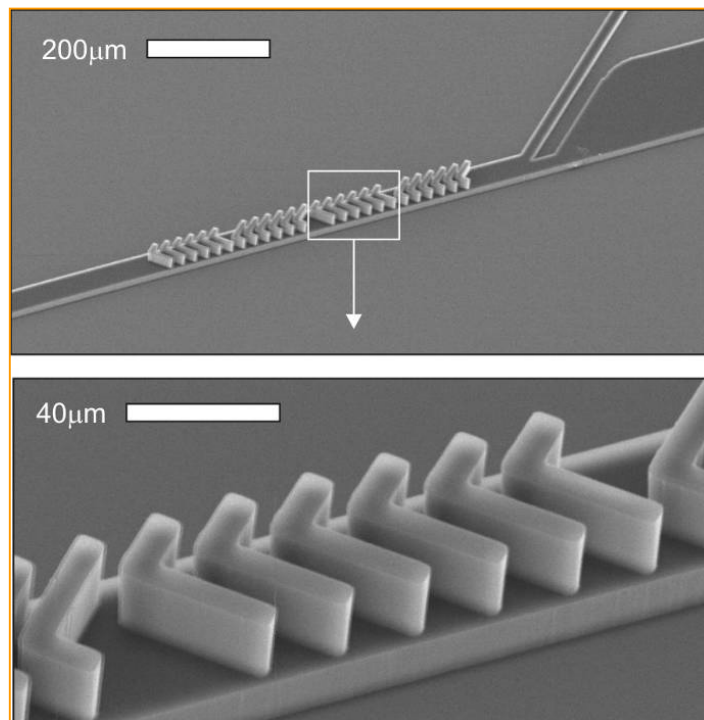


Előnyei:

- 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



GUESS WHO?

Steve Jobs
APPLE



Apple II (1977):



Lisa (1983):



Macintosh (1984):



NeXT (1989):



iMac (1998):



iPod (2001):



iPhone (2007):



iPad (2010):



SZEDJÜK SZÉT VIRTUÁLIS IPHONE-UNKAT!



2007 IPHONE

- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2008/09 IPHONE 3

- Magnetométer
- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2010/11 IPHONE 4

- Giroszkóp
- MEMS mikrofon
- RGB / Proximity COMBO
- Magnetométer
- Gyorsulásmérő
- Proximity
- Környezeti világítás

2012/13 IPHONE 5

Szenzor Hub:

- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon
- Gyorsulásmérő
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

2014 IPHONE 6

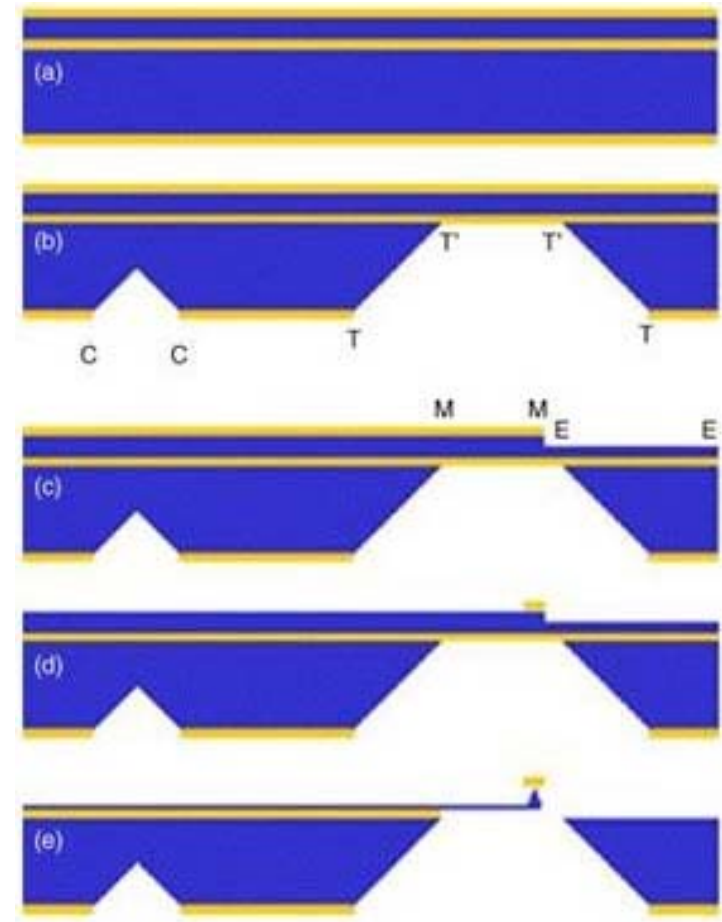
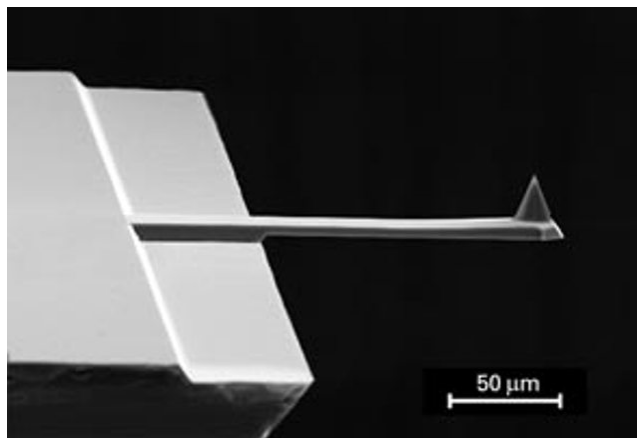
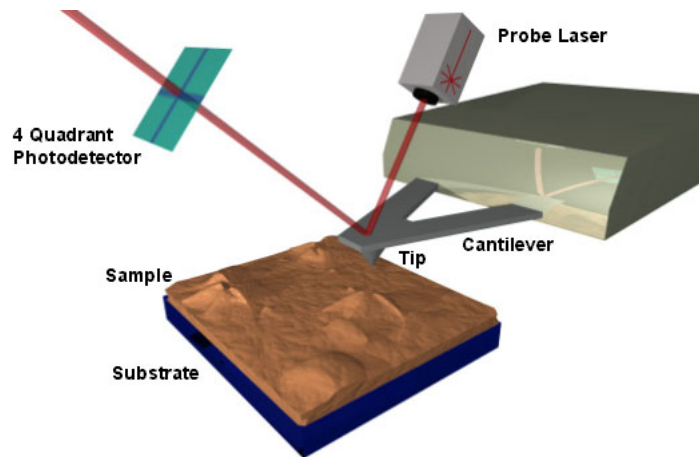
Szenzor Hub:

- Nyomás
- 6 tengelyű gyorsulásmérő
- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

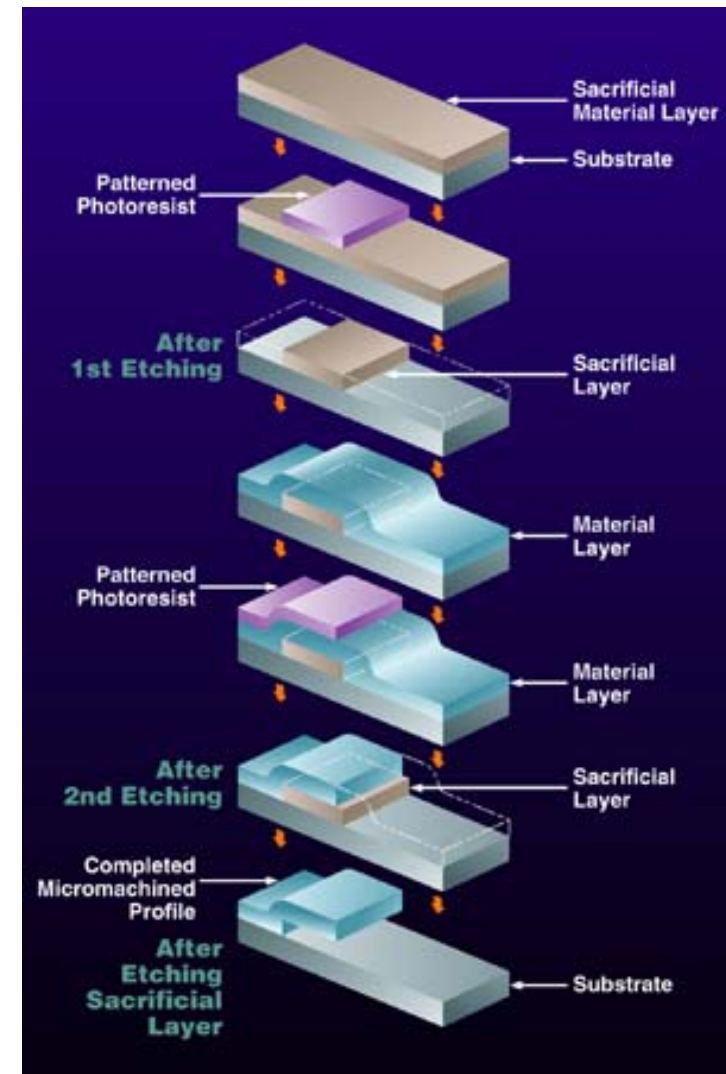
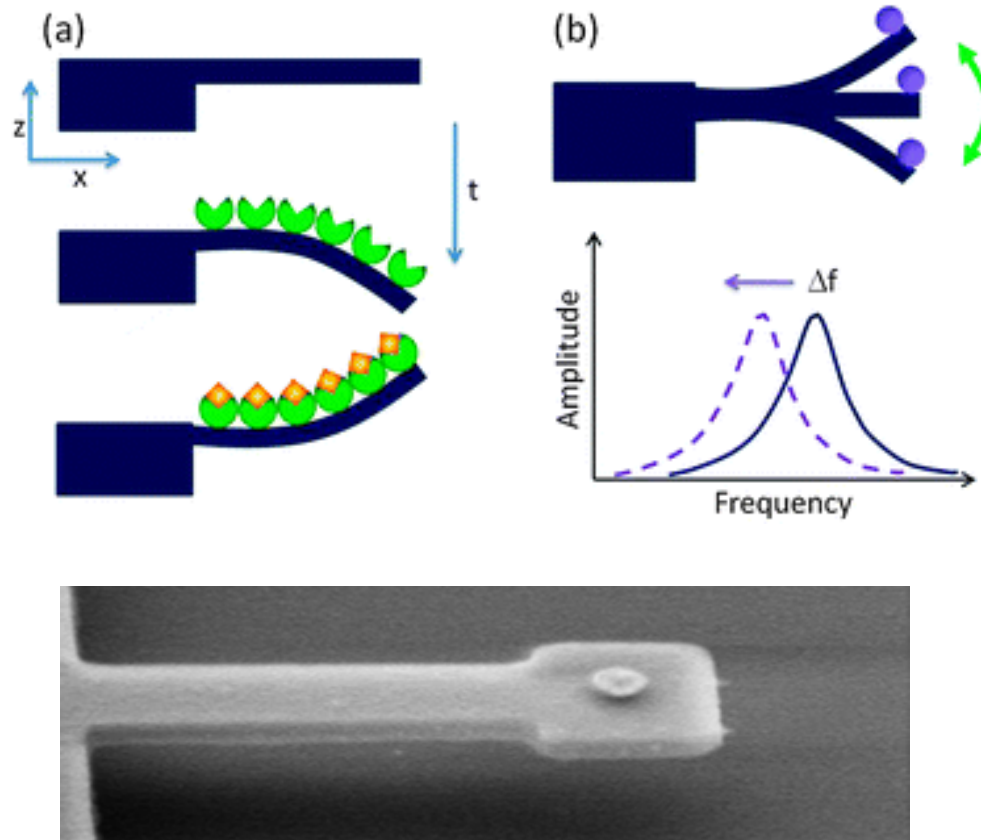
KONZOL



KONZOL – TÖMBI MIKROMECHANIKA



KONZOL FELÜLETI MIKROMECHANIKA

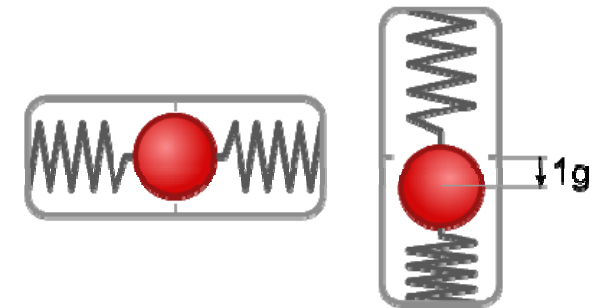


COMB DRIVE / GIRO

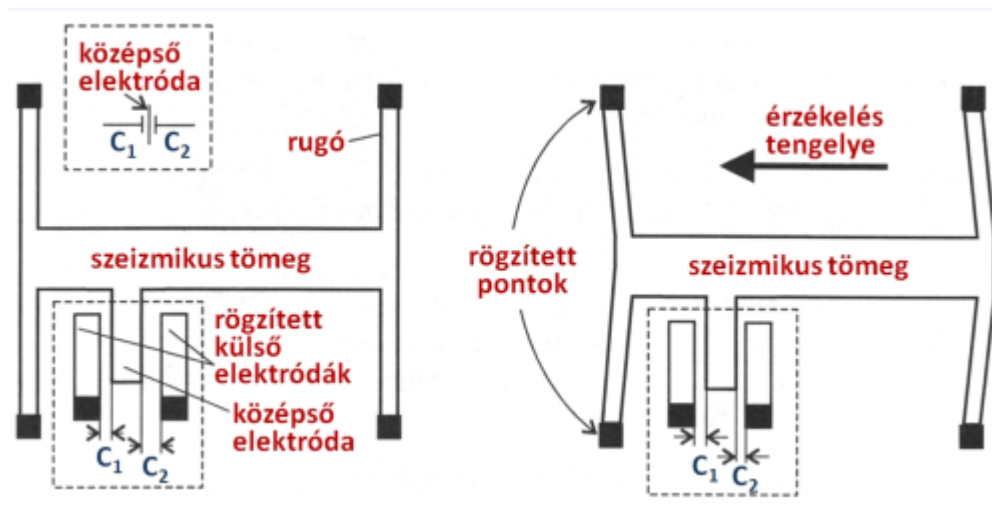


GYORSULÁS - GIRO

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése



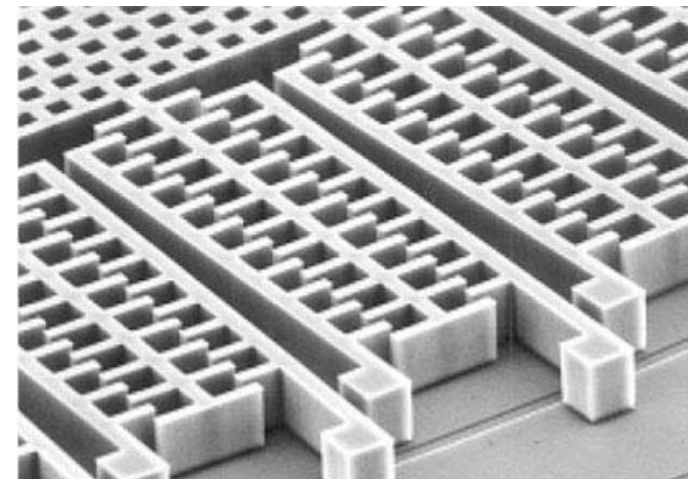
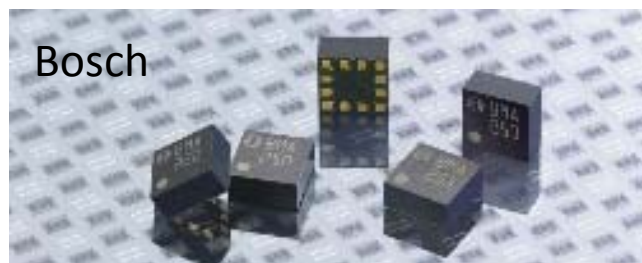
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



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

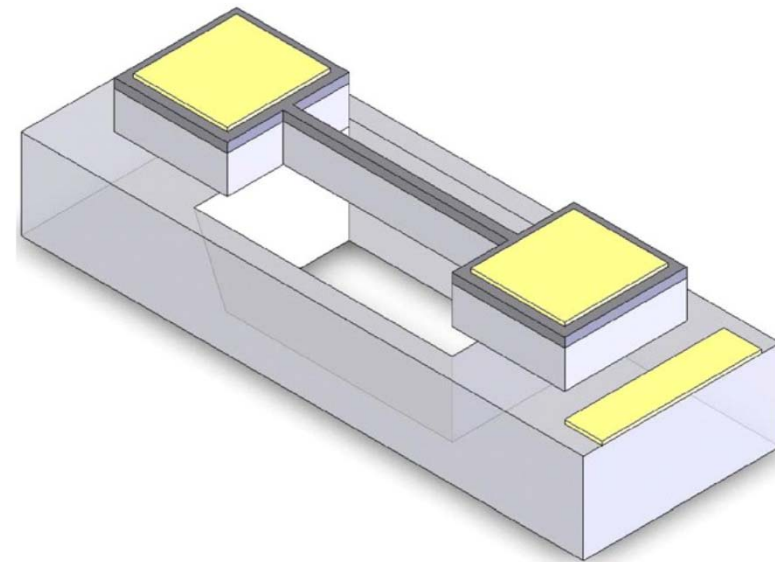
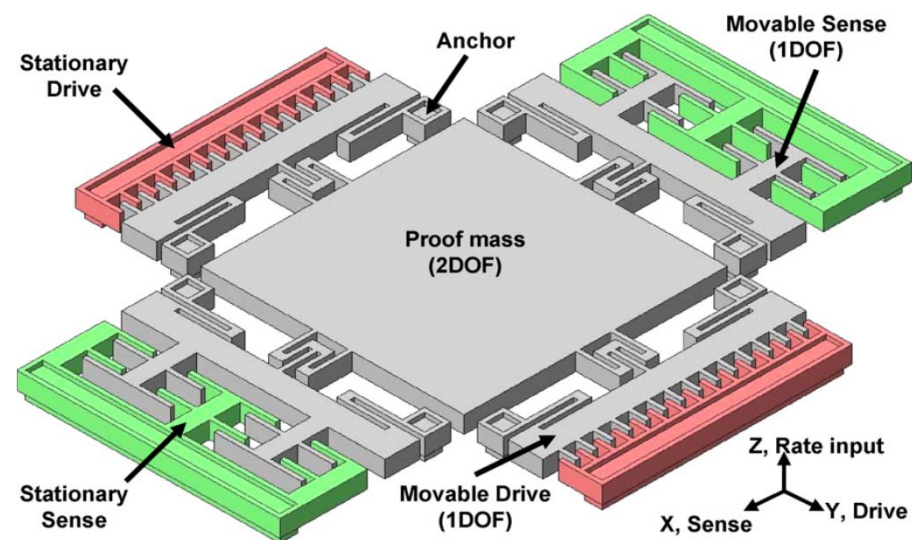
$$C_o = \epsilon \frac{A}{d}$$

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

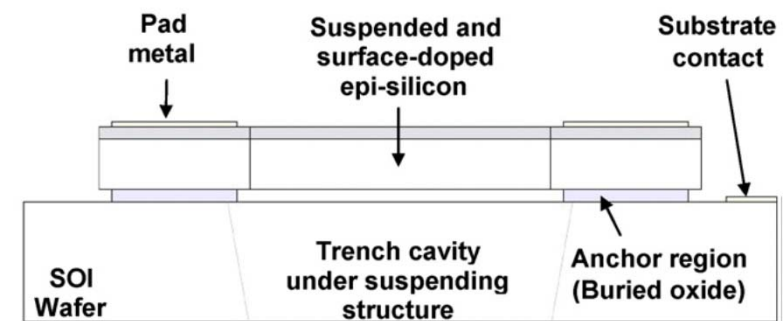
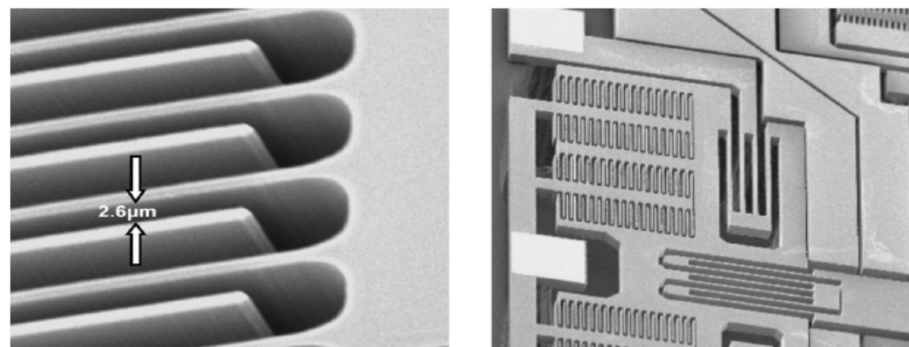


GIRO – TÖMBI MIKROMECHNAIKA

SOI



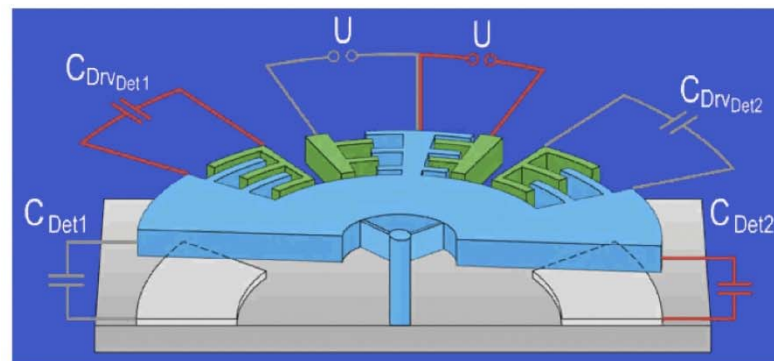
(a)



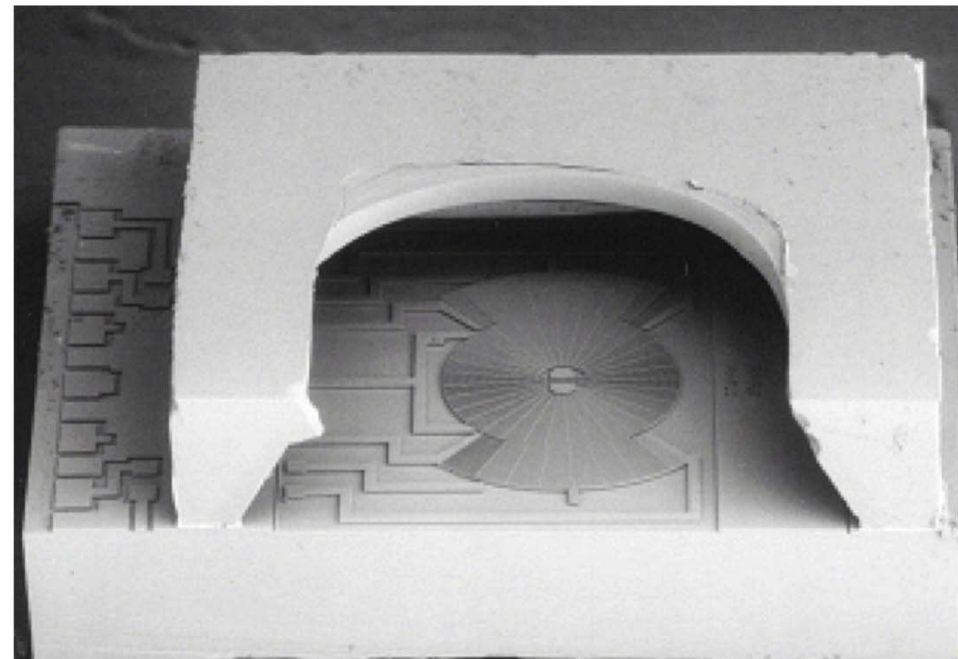
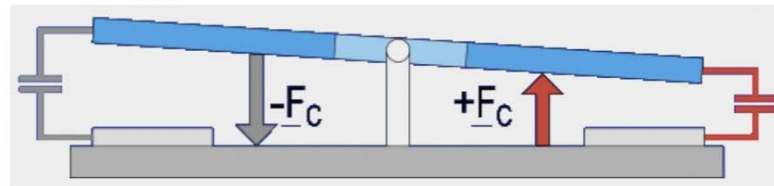
(b)

GIRO – FELÜLETI MIKROMECHNIKA

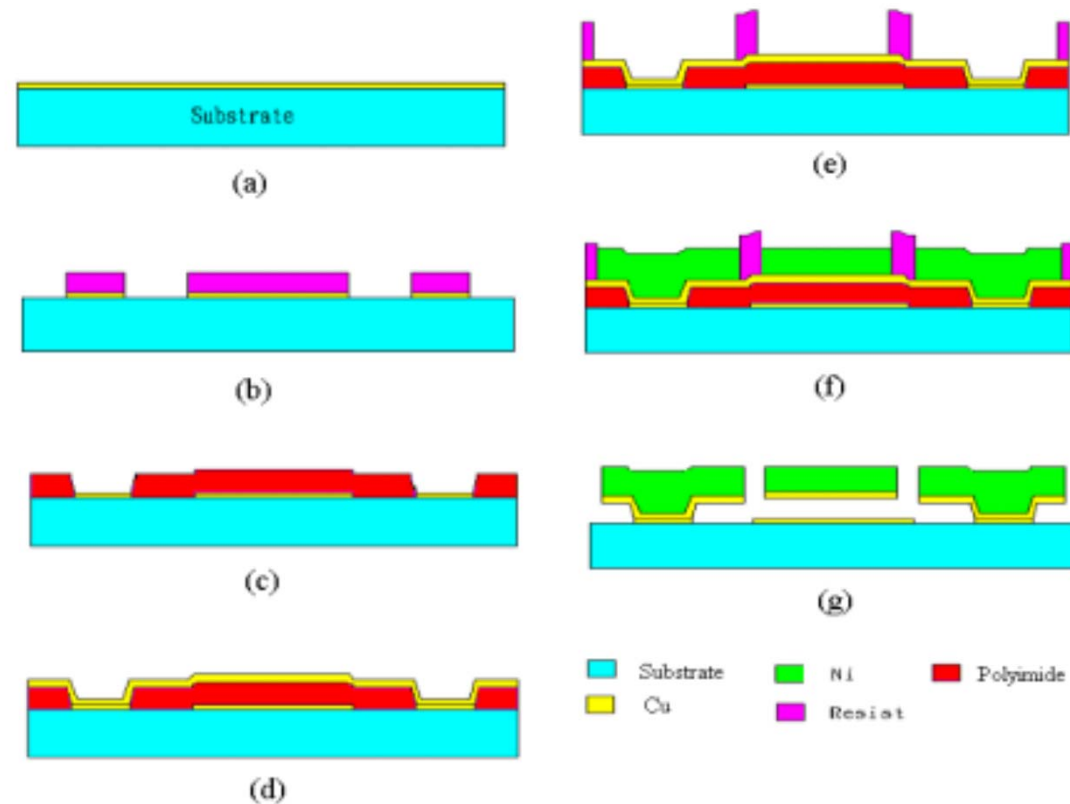
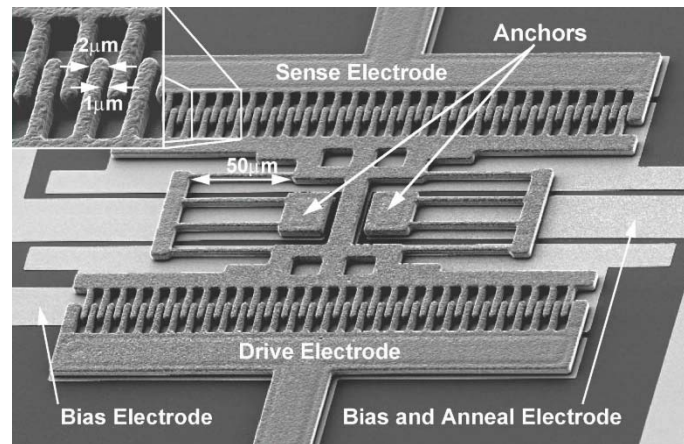
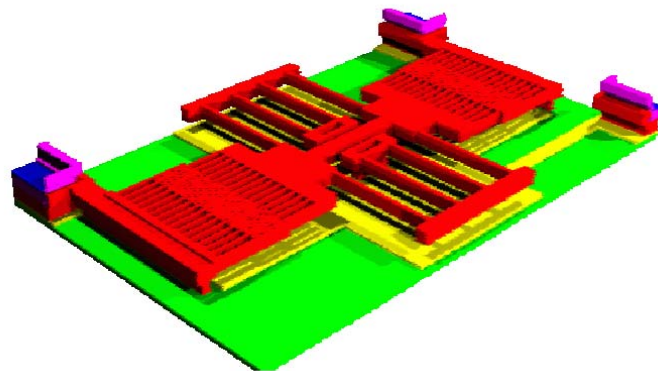
SOI



Drive mode



COMB DRIVE – FELÜLETI MIKROMECHANIKA

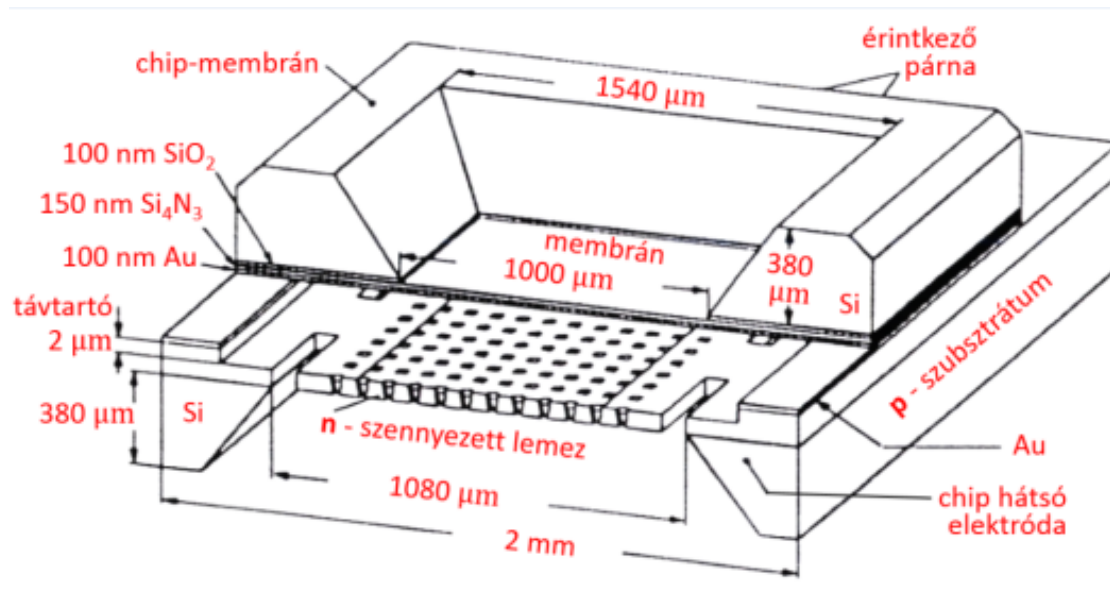


MIKROFON



MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



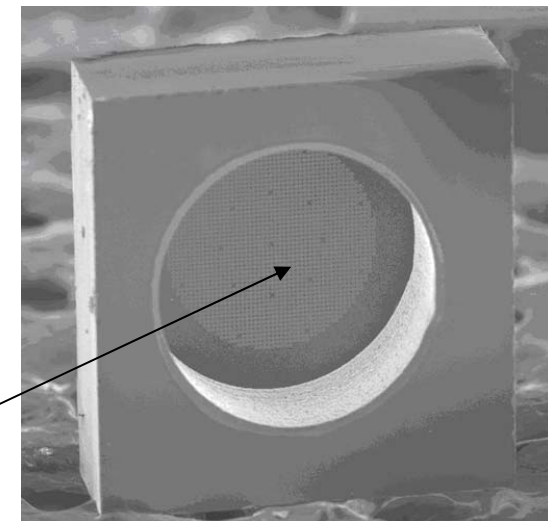
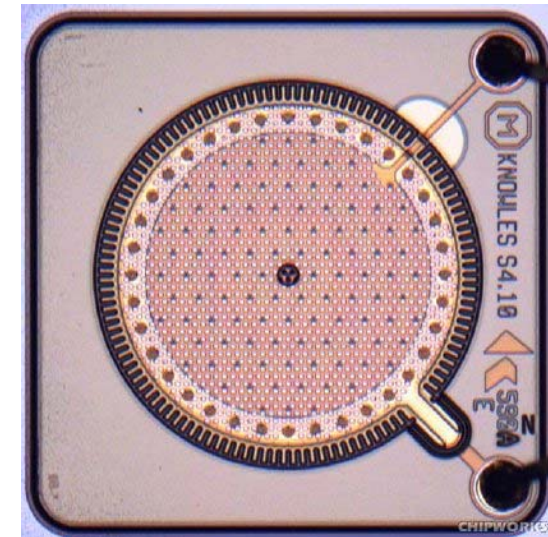
Felső elektróda: Au SiO₂ / SiN_x membránon

Alsó elektróda: nSi

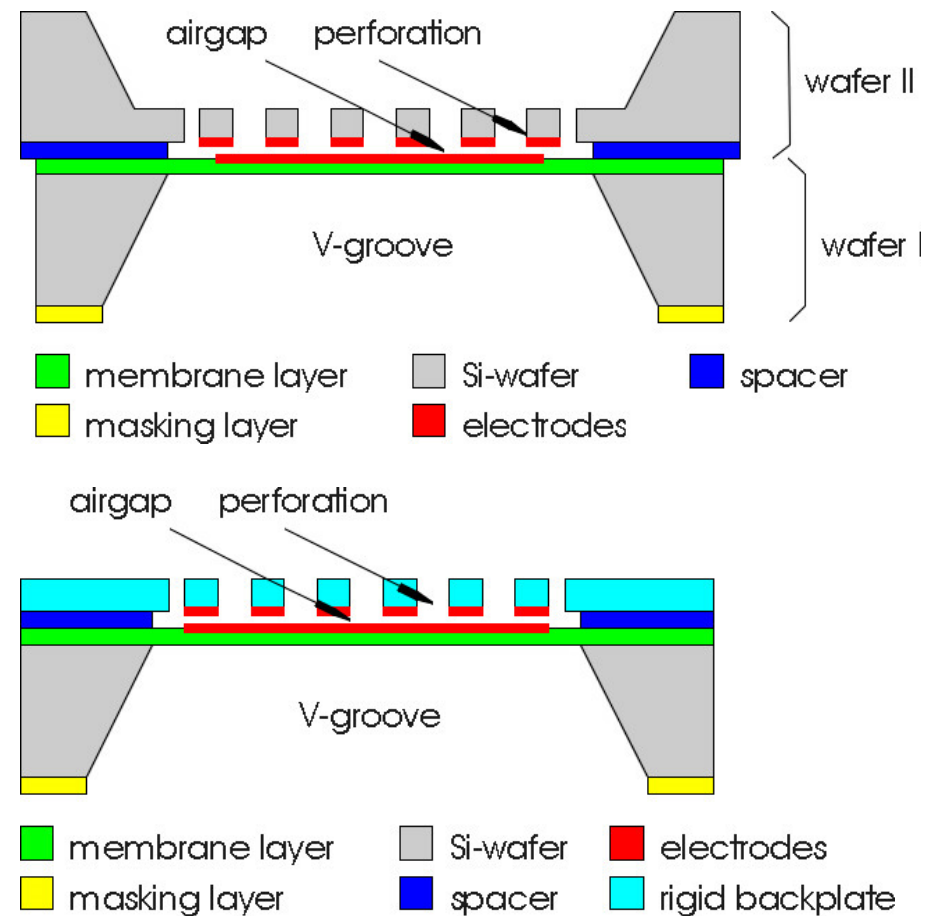
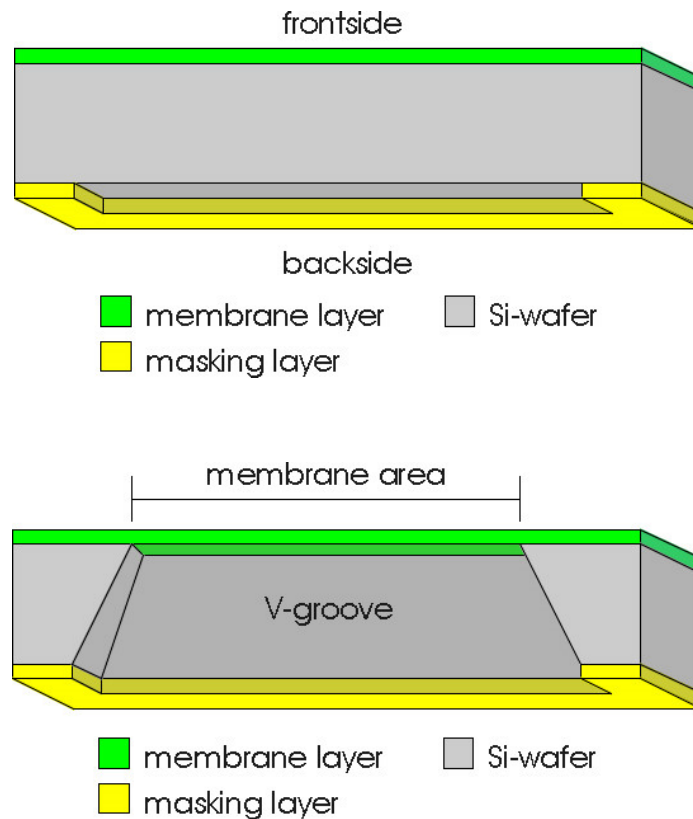
$$C_o = \epsilon \frac{A}{d}$$

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

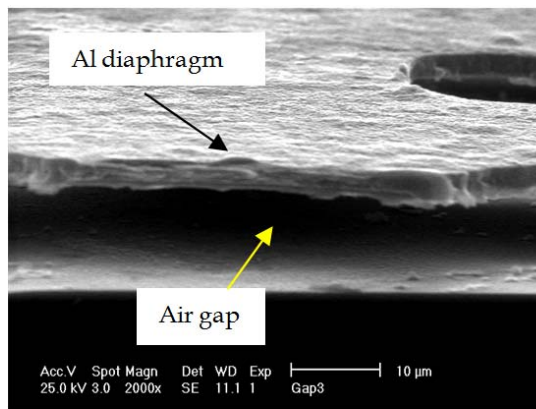
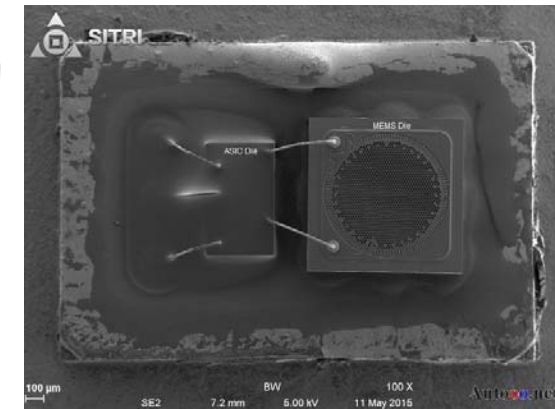
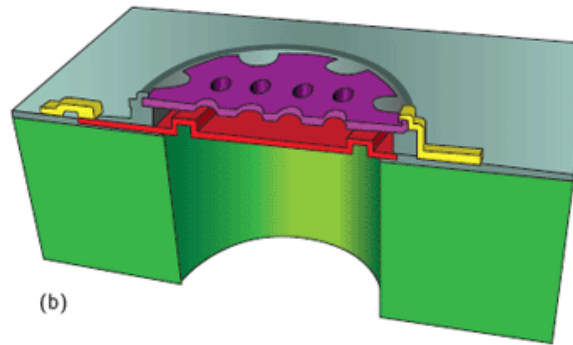
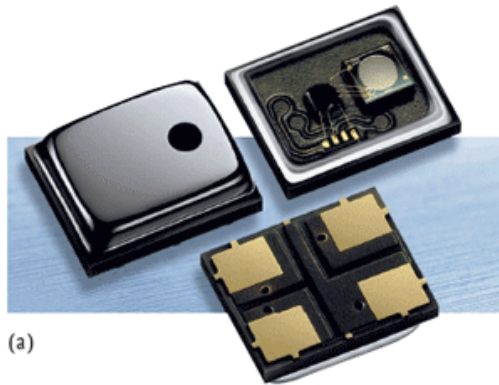
DRIE (mély
reaktív
ionmarással)
mart membrán



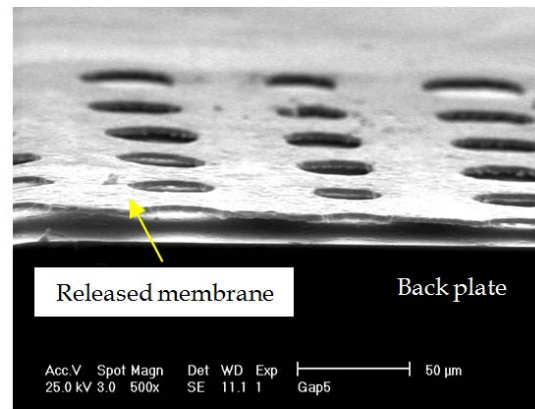
MIKROFON – TÖMBI MIKROMECHANIKA - KOH



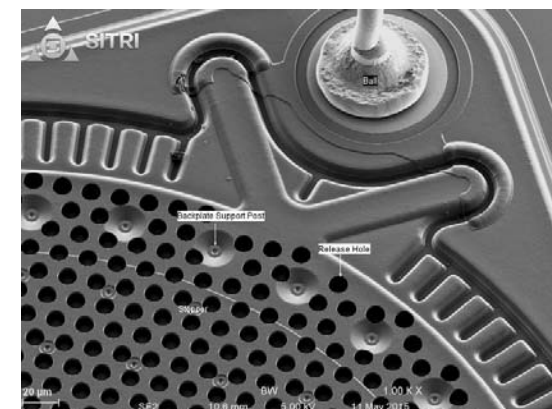
MIKROFON - TÖMBI/FELÜLETI KOMBO



(a) Air gap of microphone



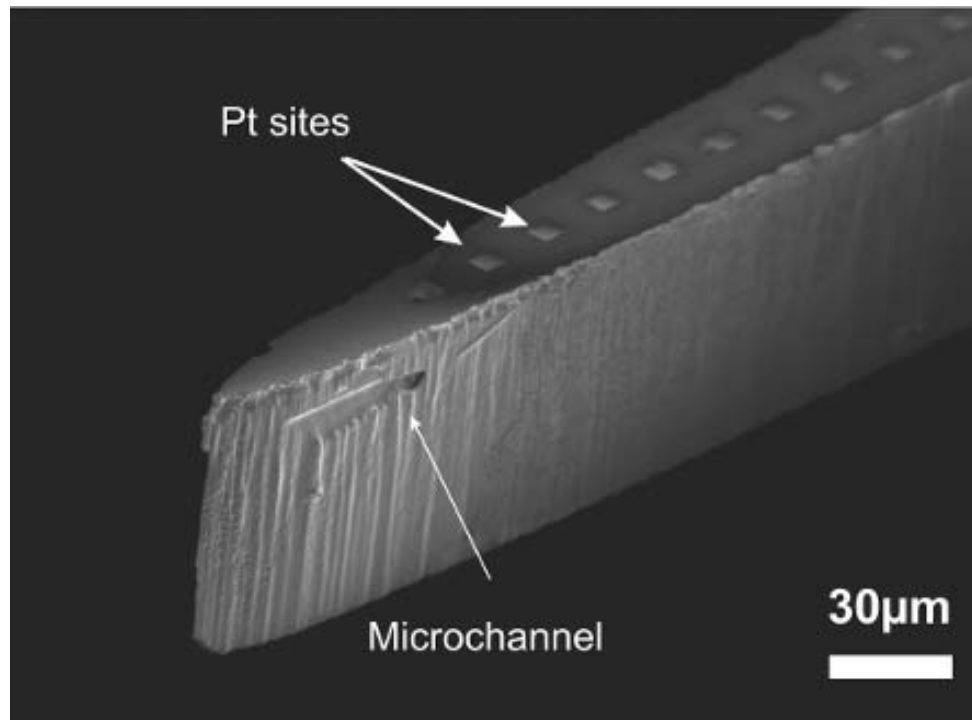
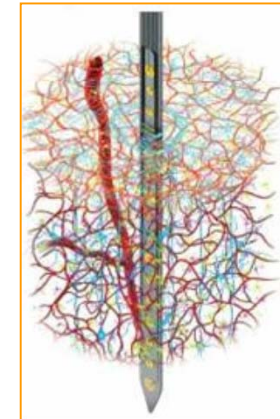
(b) Released membrane structure



TÖMBI MIKROMECHANIKA: ELTEMETETT CSATORNA

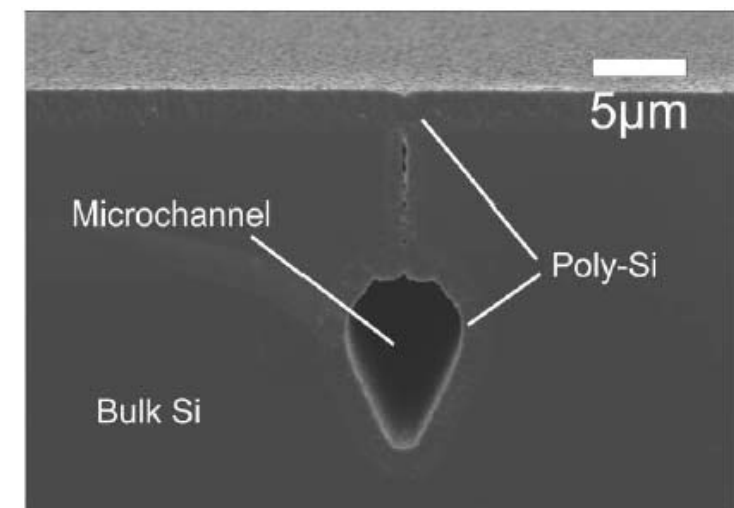
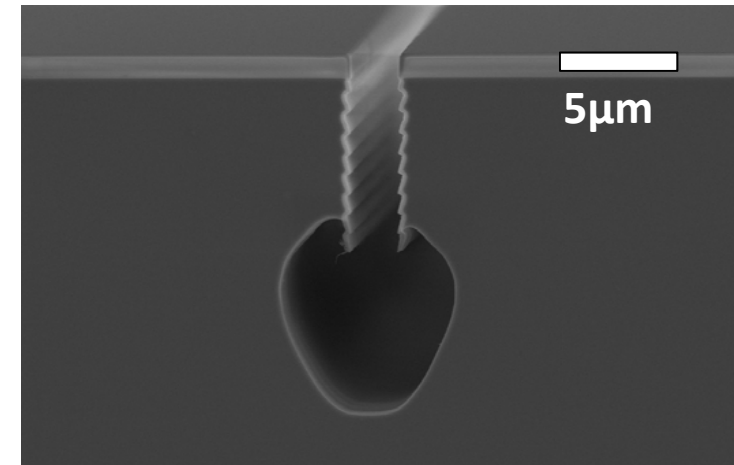
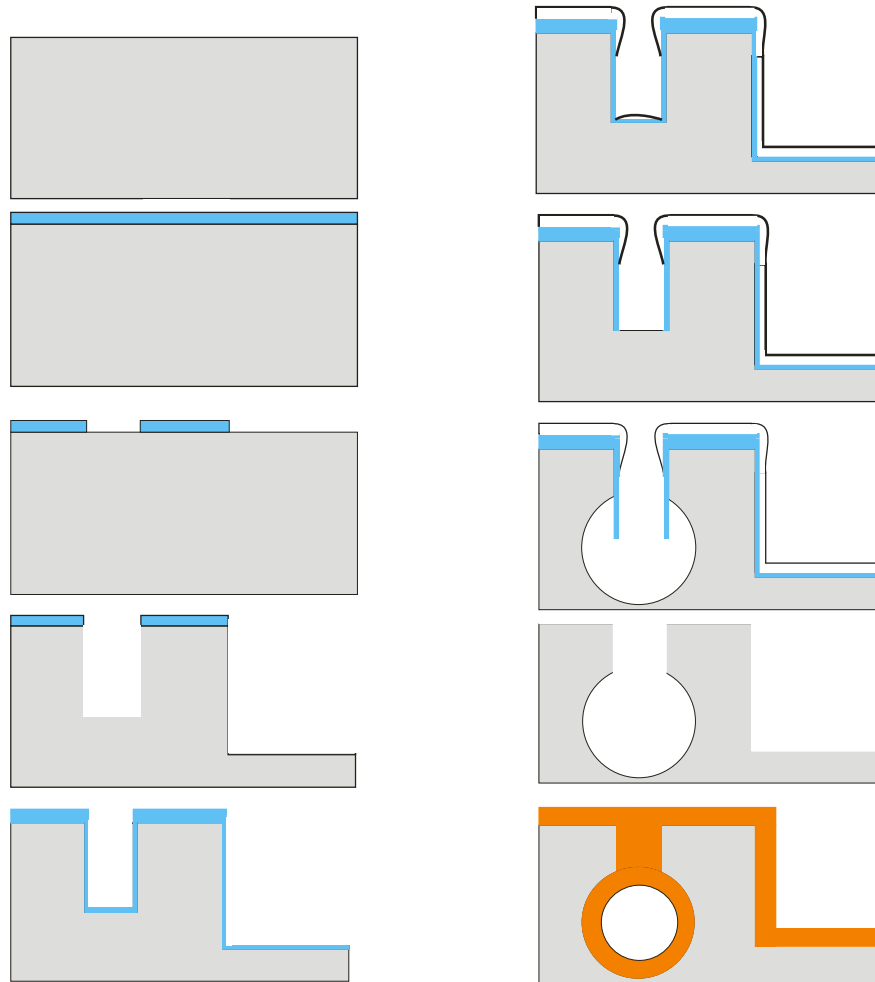


Gyógyszeradagoló csatorna szilícium neurális elektródában



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

Eltemetett mikrocsatorna technológiája



INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – MTA EK MFA



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
(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)