



Mikromechanikai technológiák

Rétegeltávolítás, marások

Fürjes Péter

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

Mit tudtok a témáról?

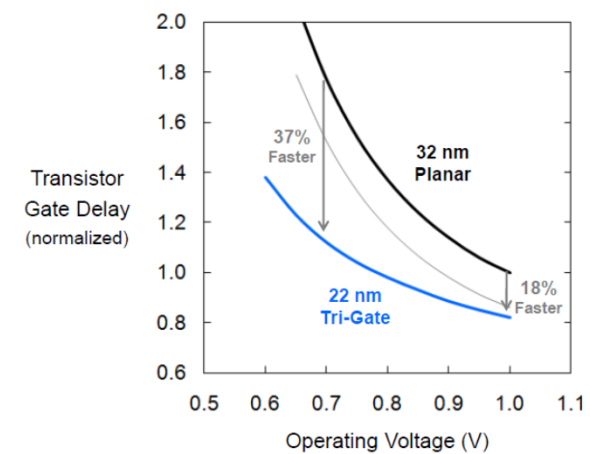
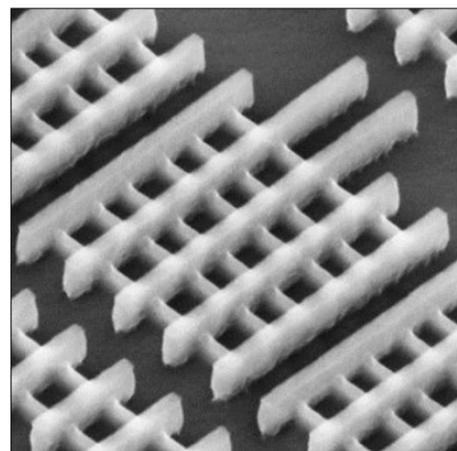
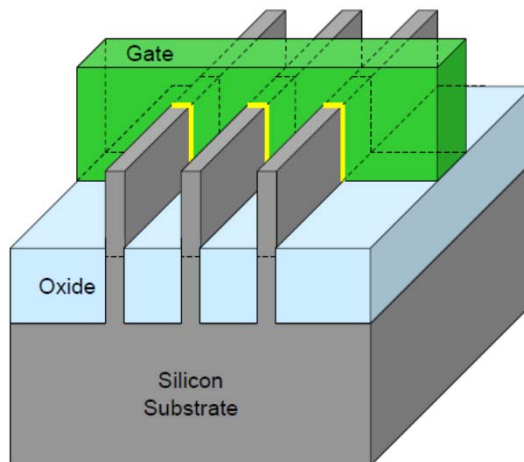
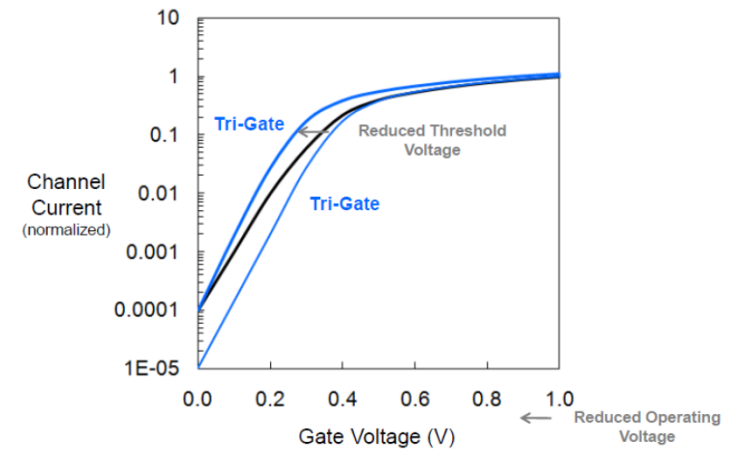
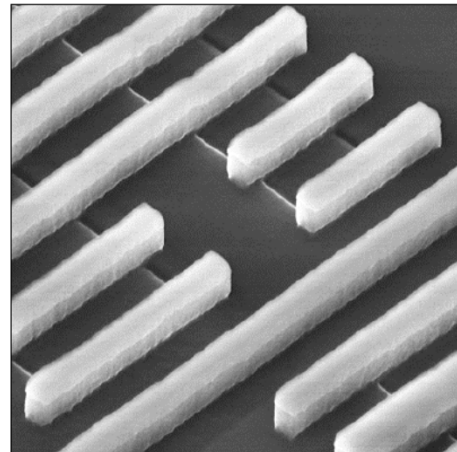
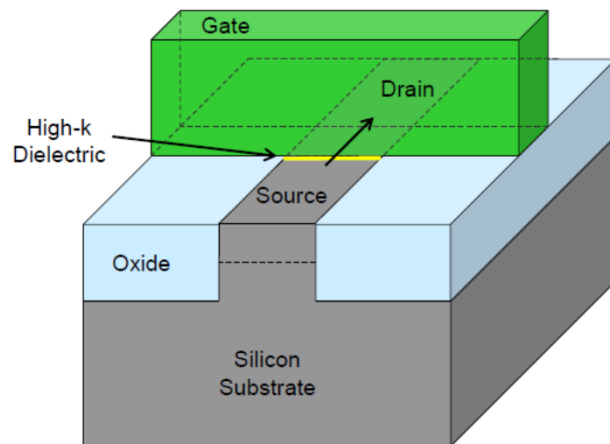
Mit jelent?

- MEMS / NEMS
- mikromechanika
- IC / CMOS (technológia)
- litográfia / lift-off
- izotróp / anizotróp marás
- RIE / DRIE
- e-beam / FIB / EBAD / IBAD
- szenzorok / beavatkozók
- ...

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.

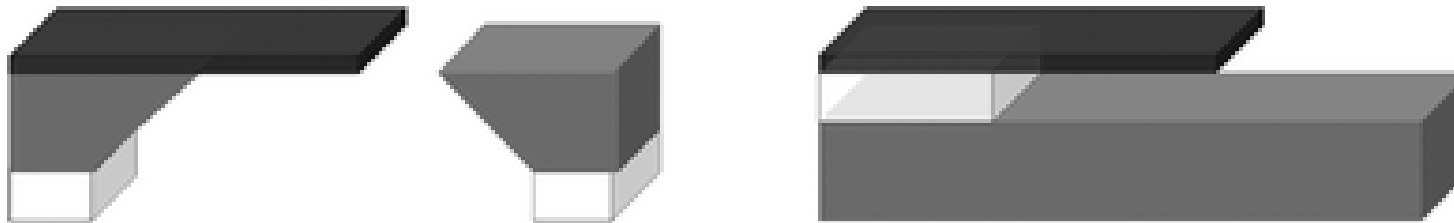
Mikromegmunkálás:

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

jellemző méretek: 1-500 μm

Si kristály vastagsága 380-500-1000 μm

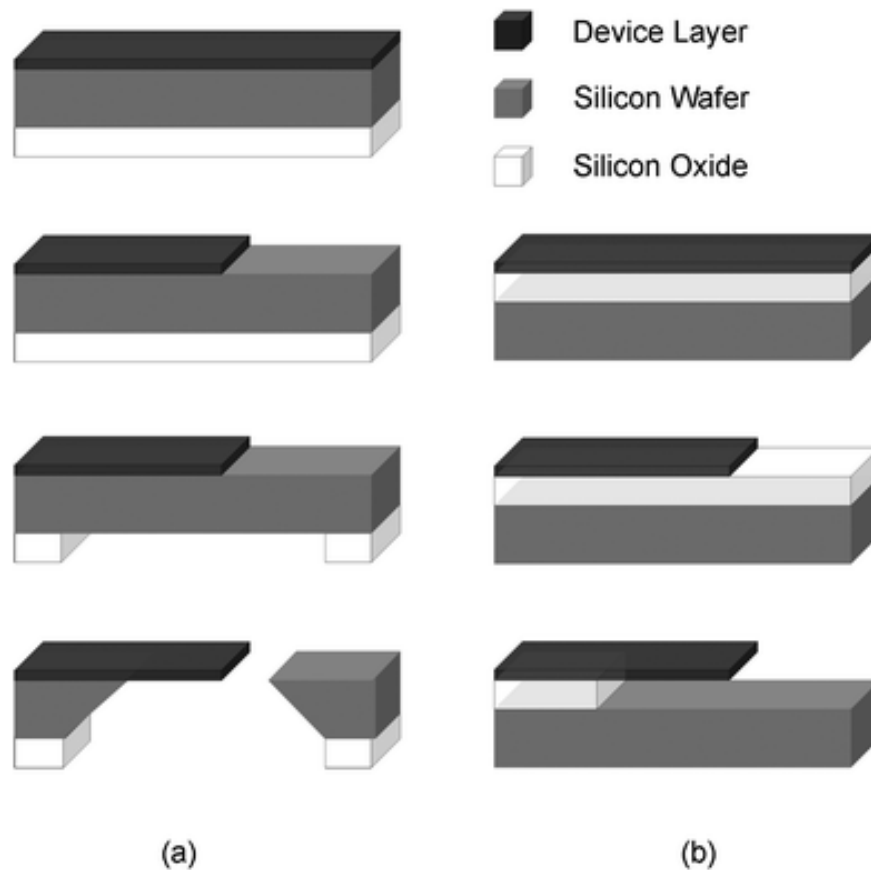
Tömbi vs. felületi mikrogépészet



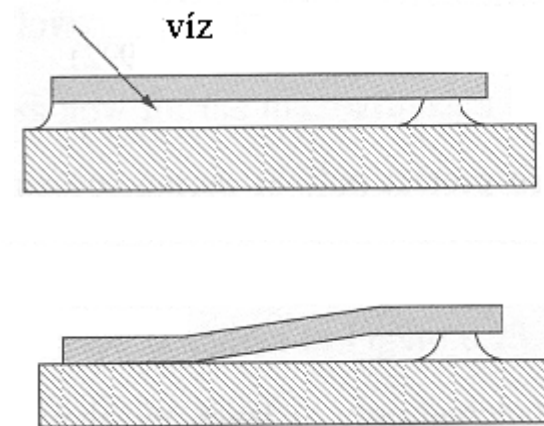
	Tömbi	Felületi
<i>Mérettartományok</i>	$2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$	$a < 2-3 \mu\text{m}$
<i>Termikus szigetelés</i>	+	-
<i>Mechanikai stabilitás</i>	+	-
<i>Membránok?</i>	egykristály	Amorf v. polikristályos

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

Tömbi vs. felületi mikromechanika

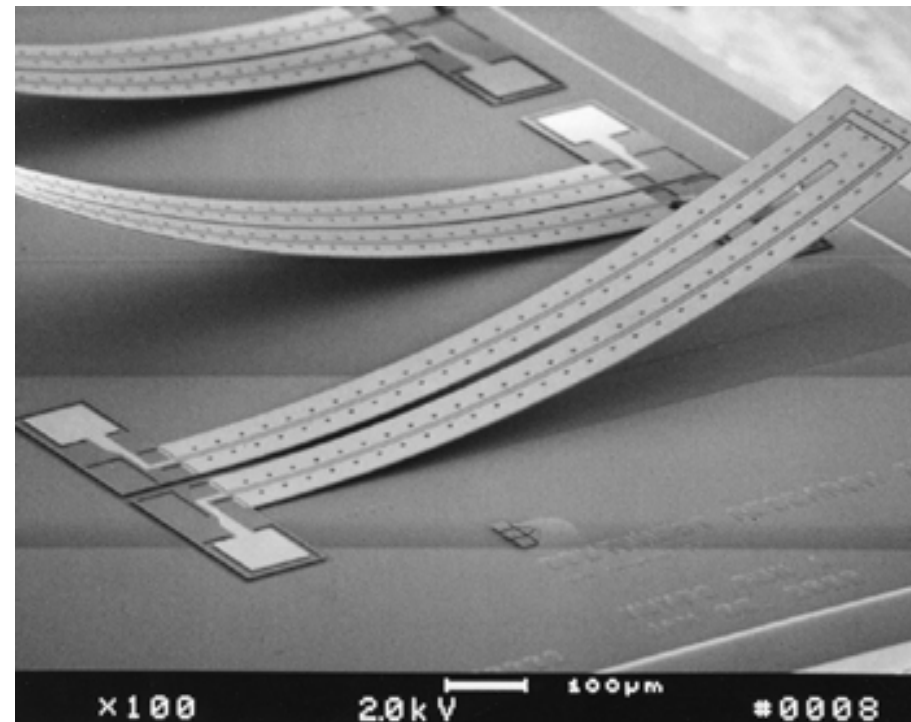
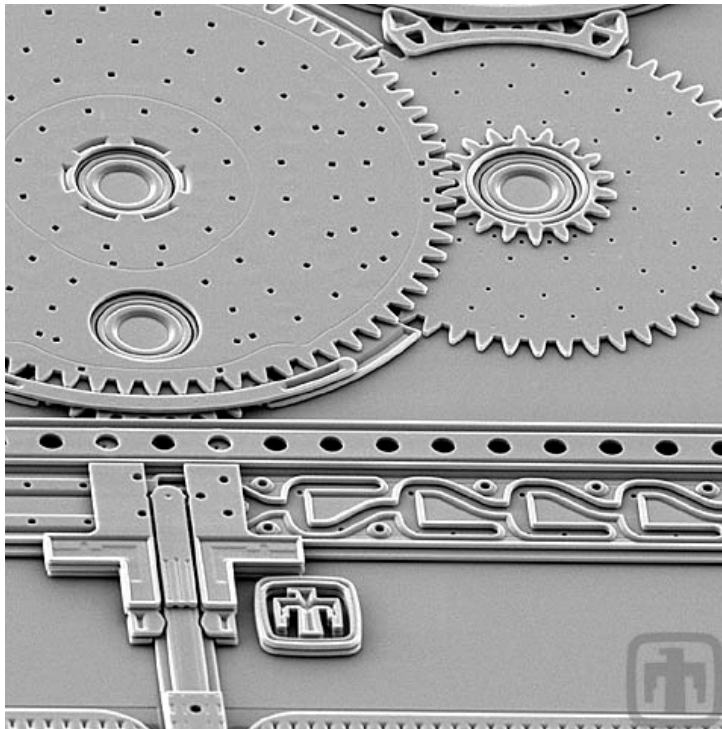


Jellegzetes hiba: letapadás

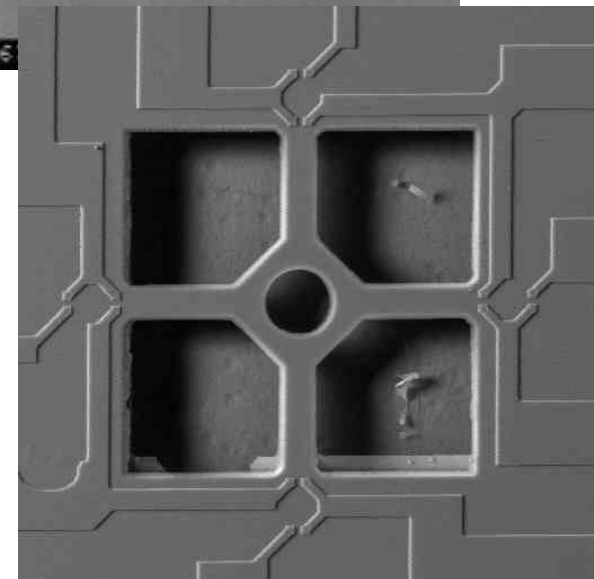
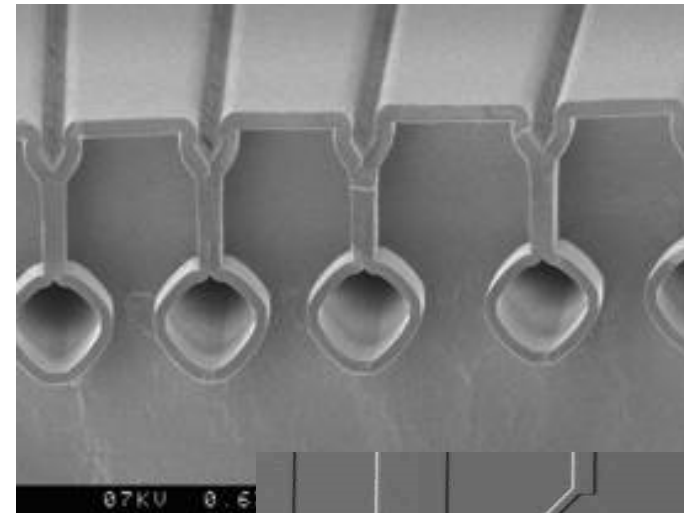
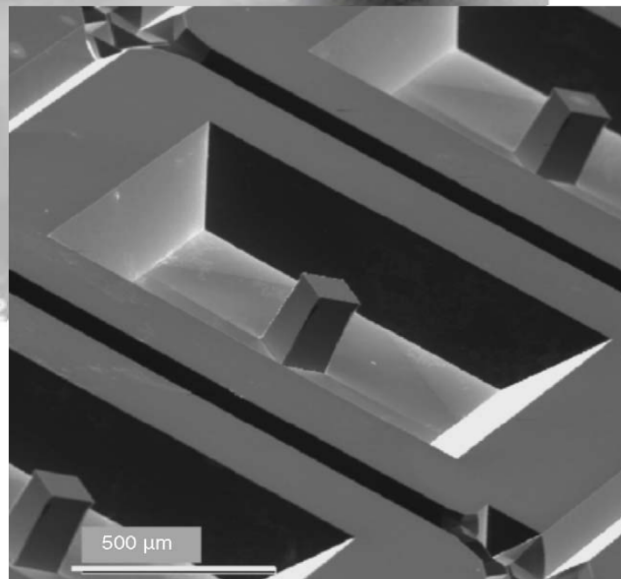
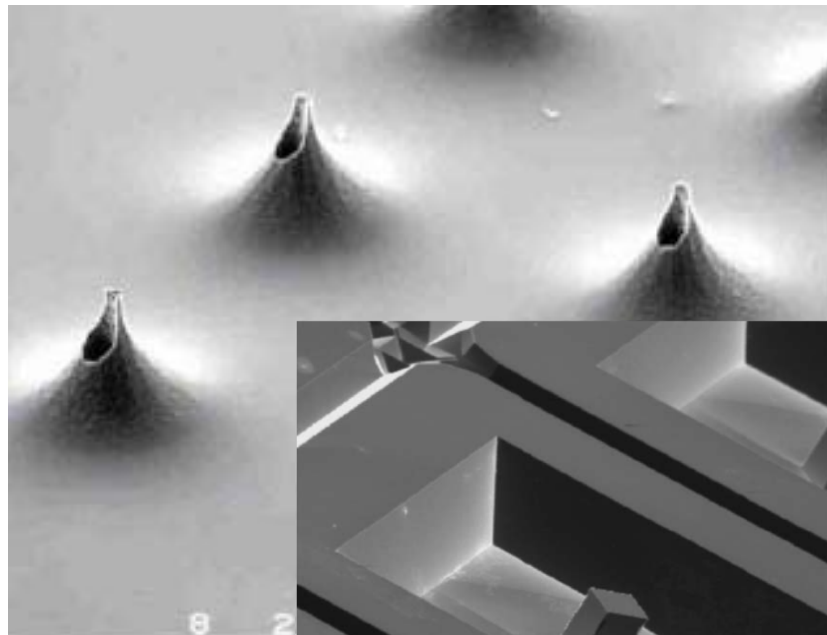


Megoldás:
beépített ütköző
vagy perforált alakzatok
vagy száraz marások

Felületi mikromechanika



Tömbi mikromechanika



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 – 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 (túlyuk, kristályhiba)

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

Kémiai marások – technológiai alkalmazások

Vékonyrétegek eltávolítása a szubsztrátról vagy a szubsztrát anyagának marása

- Sérülések eltávolítása
- Kémiai-mechanikai polírozás – optikai minőségű felület
- Kémiai tisztítás, dekontamináció
- Oxid réteg eltávolítása, fémezés előtti frissítés
- Szigetelő rétegek eltávolítása
- Üveg réteg eltávolítása getterezés után
- Fotoreziszt eltávolítás

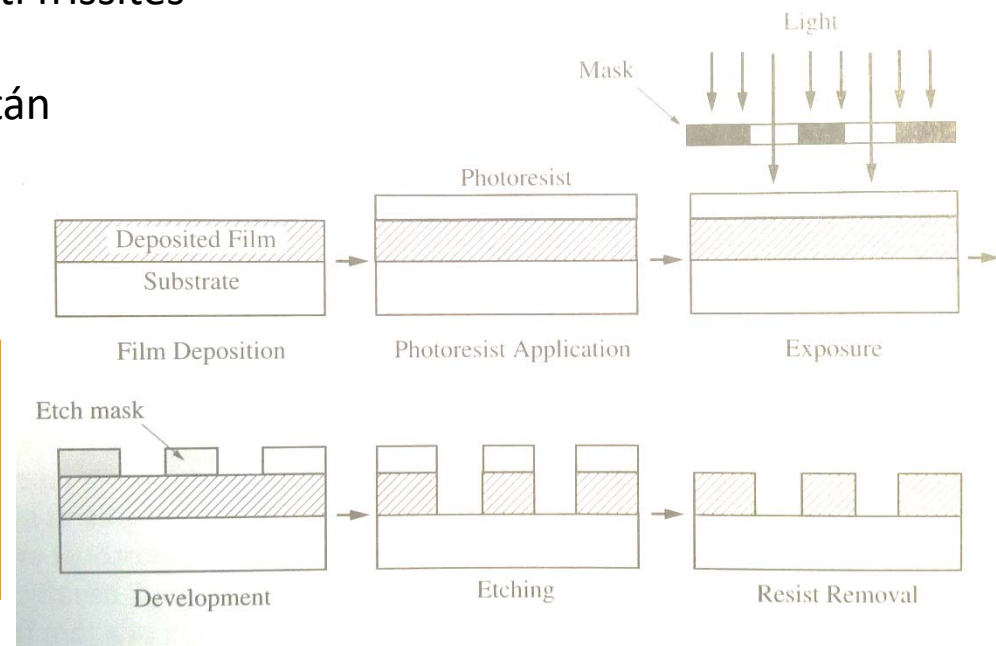
Mintázat leképezése

Előny:

- effektivitás
- megbízhatóság
- egyszerűség
- szelektivitás
- gazdaságosság

Hátrány:

izotróp marás
3µm felbontás alatt
(VLSI, ULSI) nehezen
alkalmazhatók



Kémiai marások – technológiai alkalmazások



Kémiai marások

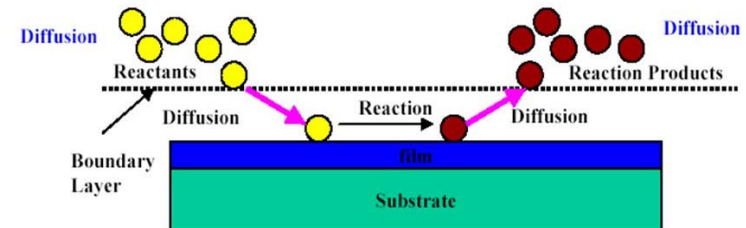
A marási eljárásokkal szemben támasztott követelmények:

- **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)

Nedves marások kémiája

Folyamatok

- Reagensek áramlása / diffúziója a felülethez
- Reagensek adszorpciója a felületen
- Kémiai reakció
- Reakciótermékek deszorpciója a felületről
- Reakciótermékek eltávolítása a felülettől



Diffúziólimitált folyamat: a marási sebességet a reagens felülethez vagy a reakciótermék felülettől történő áramlási sebessége befolyásolja. Paraméterek:

- A marószer viszkozitása
- Keverés / mozgatus sebessége

Aktiváció / reakciólimitált folyamat: a marási sebességet a reakcióban résztvevő részecskék / anyagok reaktivitása befolyásolja. Paraméterek:

- Szennyező típus és koncentráció
- Kritálytani orientáció
- Hőmérséklet

Nedves marások kémiája

Marási sebességet befolyásoló faktorok

- Reagensek koncentrációja a marószerben
- A marószer viszkozitása
- Hőmérséklet
- Keverés / mozgatus sebessége
- A reakciótermék oldhatósága a marószerben

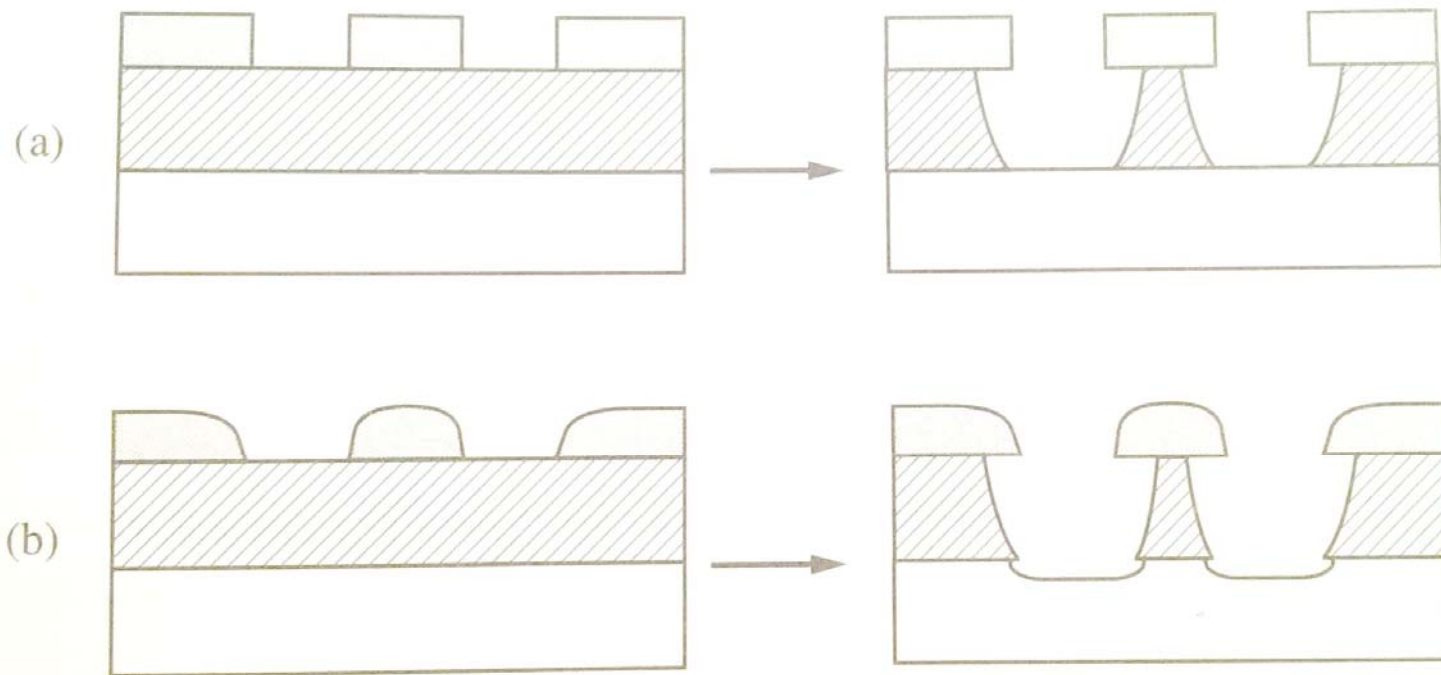
Kémiai marószerek tisztasága:

- Analitikai minőség: ppm szennyezőkoncentráció
- Elektronikai minőség: ppb szennyezőkoncentráció
- MOS minőség: alacsony Na koncentráció
- Ultra VLSI minőség (nagyon drága)
- DI víz: ppt szennyezőkoncentráció

Nedves marások sebességfüggése

Szelektivitás:

A marási sebesség anyagfüggése (nagyon fontos pl. maszkoló anyagra nézve)



Szelektivitás a maszkoló anyagra

Definíció:

$$S = \frac{\text{hordozó marási sebessége}}{\text{réteg marási sebessége}}$$

<i>Material</i>	<i>Etchants</i>	<i>Selective To</i>
Si	HF, HNO ₃ , CH ₃ COOH	SiO ₂
Si	KOH	SiO ₂
SiO ₂	NH ₄ , HF	Si
SiO ₂	HF, NHO ₃ , H ₂ O	Si
SiO ₂	H ₃ PO ₄ , NHO ₃ , H ₂ O	Si
Si ₃ N ₄	H ₃ PO ₄	SiO ₂
Al	H ₃ PO ₄ , HNO ₃ , H ₂ O	SiO ₂

Etchant	Etch rate ratio		Etch rate (absolute)		
	(100)/(111)	(110)/(111)	(100)	Si ₃ N ₄	SiO ₂
KOH (44%, 85°C)	300	600	1.4 μm/min	<1 Å/min	14 Å/min

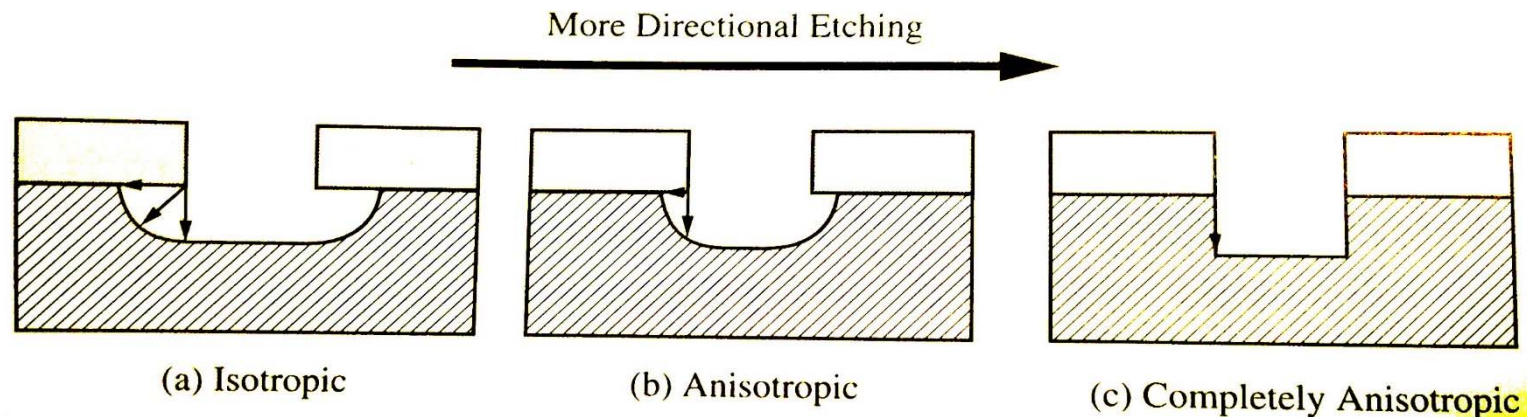
Nedves marások sebesének irányfüggése

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

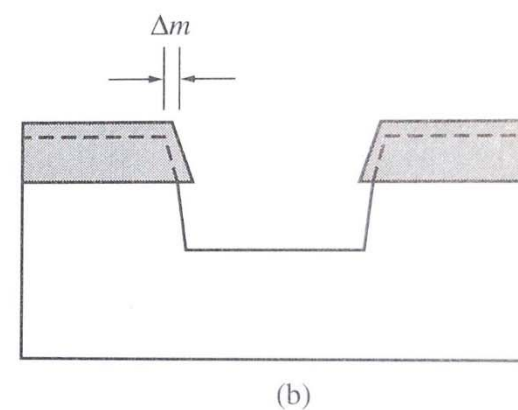
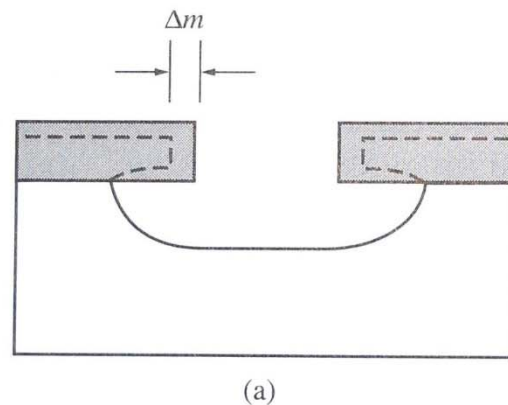


Nedves marások sebesének irányfüggése

$$\text{Anizotrópia} = \frac{\text{Marás mélysége}}{\text{Oldalirányú alámarás}}$$

Izotróp $\rightarrow x = y$

Anizotróp $\rightarrow x \ll y$



- Izotróp marási eljárások:
HF/HNO₃ rendszer (poli-maró), pórusos Si marás
- Anizotróp marási eljárások:
Lúgos marószerek (KOH, NaOH, EDP, TMAH stb.)
- Átmeneti eljárások: plazmás marások (pl. RIE)

Nedves marások technológiái

Immerziós marás

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

Spray marás

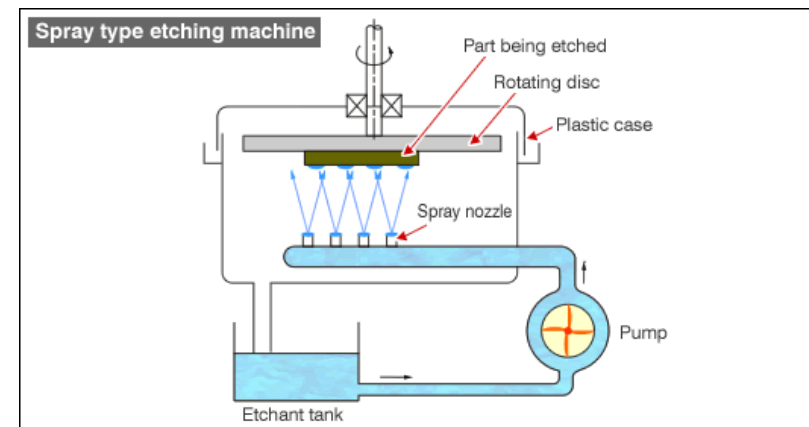
- Hatékony sebességkontrol (paraméterek: porlasztási cseppméret és nyomás)
- Megnövelt marási sebesség a folyamatosan friss marószer miatt
- Kevés szelet

Kemo-mechanikai marás

- Szeletpolírozás (Si szelet vagy polimerek)

Elektrokémiai marás

- Szelektivitás és sebességkontrol (paraméterek: potenciál vagy áram)

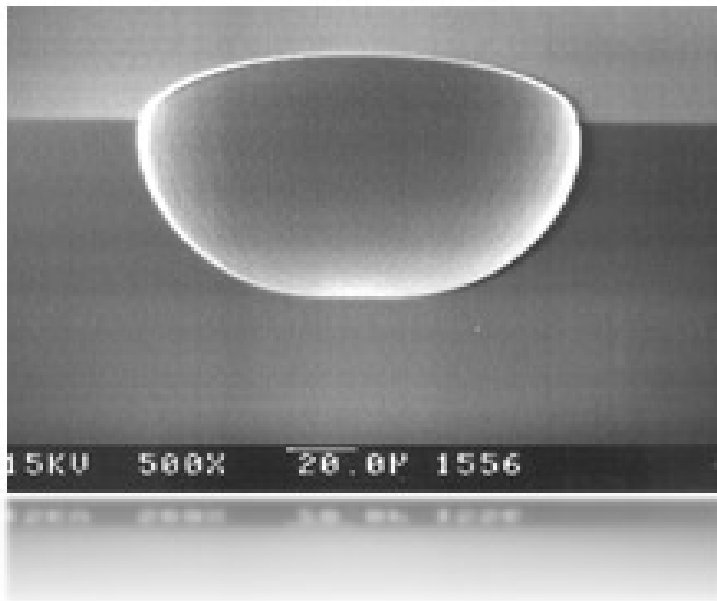


Nedves marási rendszerek

Table 10-1 Common wet chemical etchants for various thin films used in IC fabrication

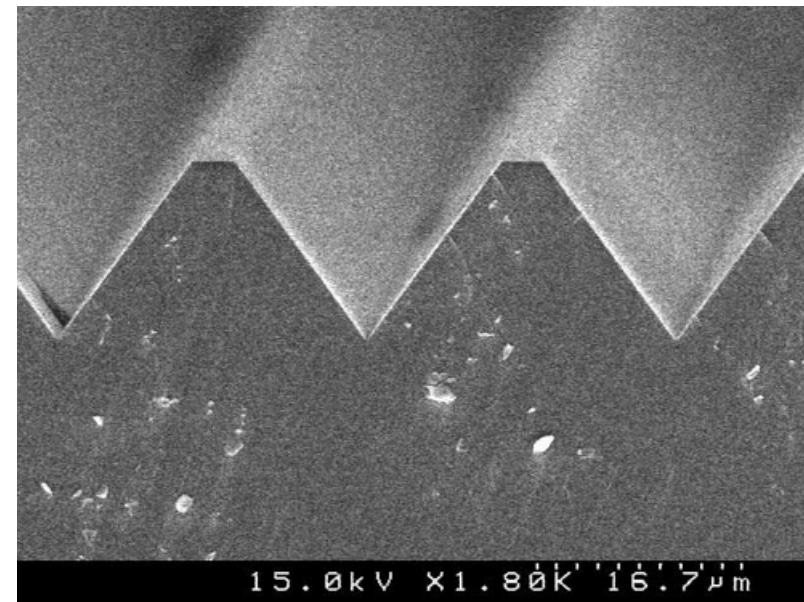
Material	Etchant	Comments
SiO ₂	HF (49% in water) "straight HF" NH ₄ F:HF (6:1) "Buffered HF" or "BOE"	Selective over Si (i.e., will etch Si very slowly in comparison). Etch rate depends on film density, doping. About 1/20 th the etch rate of straight HF. Etch rate depends on film density, doping. Will not lift up photoresist like straight HF.
Si ₃ N ₄	HF (49%) H ₃ PO ₄ :H ₂ O (boiling @ 130–150°C)	Etch rate depends strongly on film density, O, H in film. Selective over SiO ₂ . Requires oxide mask.
Al	H ₃ PO ₄ :H ₂ O:HNO ₃ :CH ₃ COOH (16:2:1:1)	Selective over Si, SiO ₂ , and photoresist.
Polysilicon	HNO ₃ :H ₂ O:HF (+ CH ₃ COOH) (50:20:1)	Etch rate depends on etchant composition.
Single crystal Si	HNO ₃ :H ₂ O:HF (+ CH ₃ COOH) (50:20:1) KOH:H ₂ O:IPA (23 wt. % KOH, 13 wt. % IPA)	Etch rate depends on etchant composition. Crystallographically selective; relative etch rates: (100): 100 (111): 1
Ti	NH ₄ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O (1:1:5)	Selective over TiSi ₂ .
TiN	NH ₄ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O (1:1:5)	Selective over TiSi ₂ .
TiSi ₂	NH ₄ F:HF (6:1)	
Photoresist	H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ (125°C) Organic strippers	For wafers without metal. For wafers with metal.

Marási sebesség irányfüggése



Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség

(pl. poli-maró - $\text{HF-HNO}_3\text{-CH}_3\text{COOOH}$)



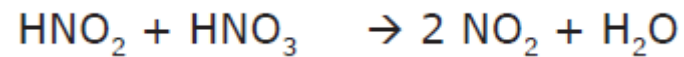
Anizotróp: a különböző kristálytani irányokban más és más a marási sebesség

(pl. lúgos maró – KOH)

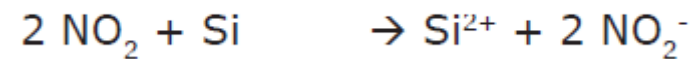
Si izotróp marása

HF/HNO₃ rendszer marási mechanizmusa

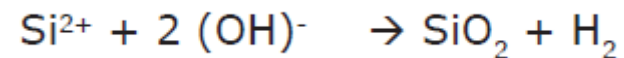
(1) NO₂ képződés



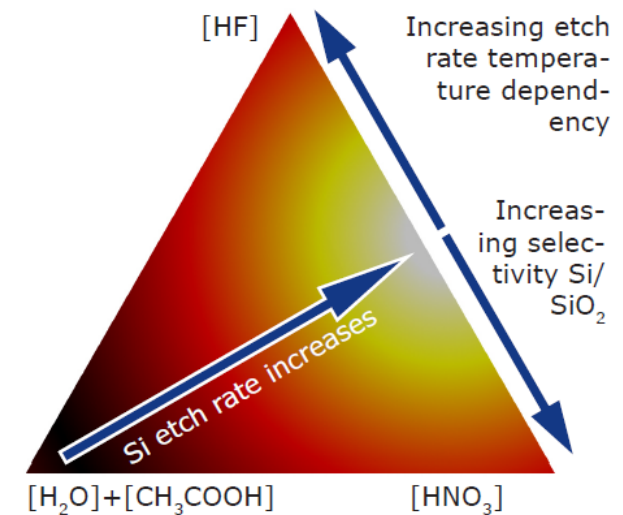
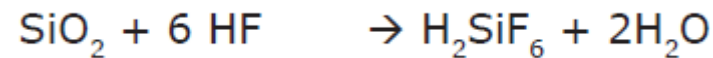
(2) Si oxidációja NO₂ által



(3) SiO₂ képződés

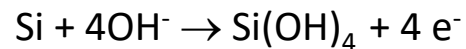


(4) SiO₂ marása

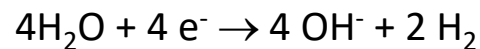


Si anizotróp lúgos marása

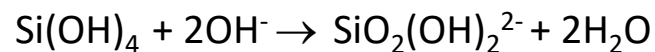
- OXIDÁCIÓ



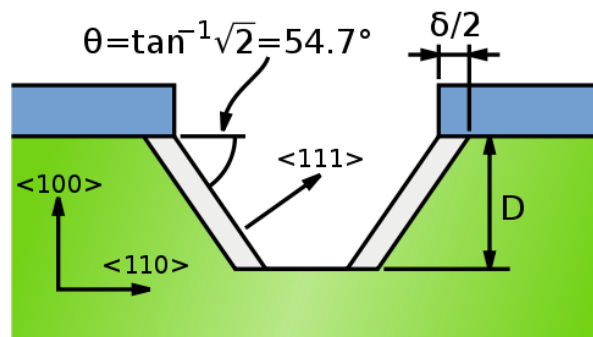
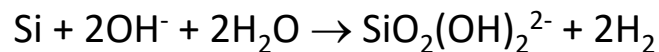
- REDUKCIÓ



- OLDÓDÁS



Bruttó reakció



A marási sebesség függ:

1) Koncentrációtól

$$R \cong [\text{H}_2\text{O}]^4 \cdot [\text{KOH}]^{1/4}$$

2) Hőmérséklettől

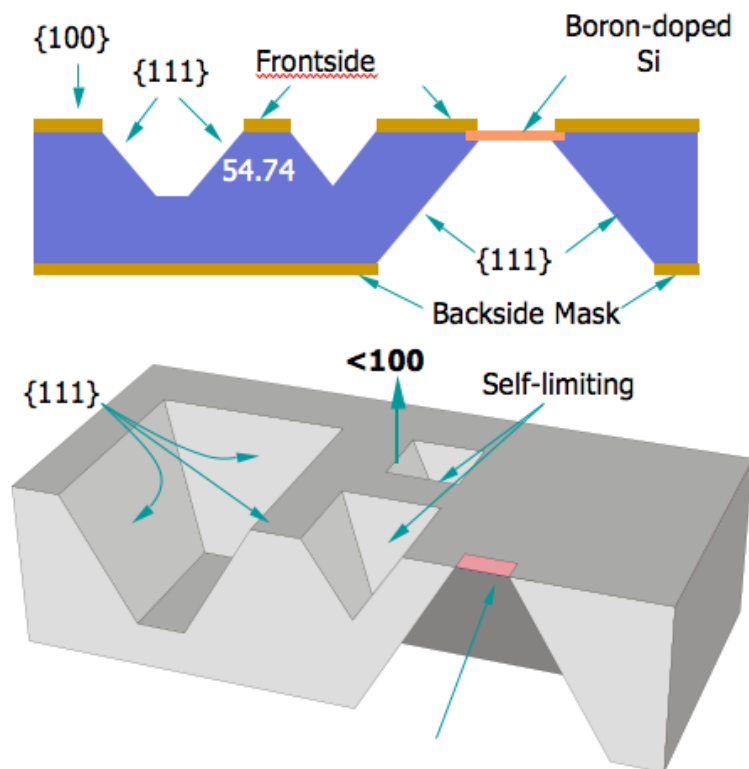
$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

3) Reakciótermékek diffúziójától

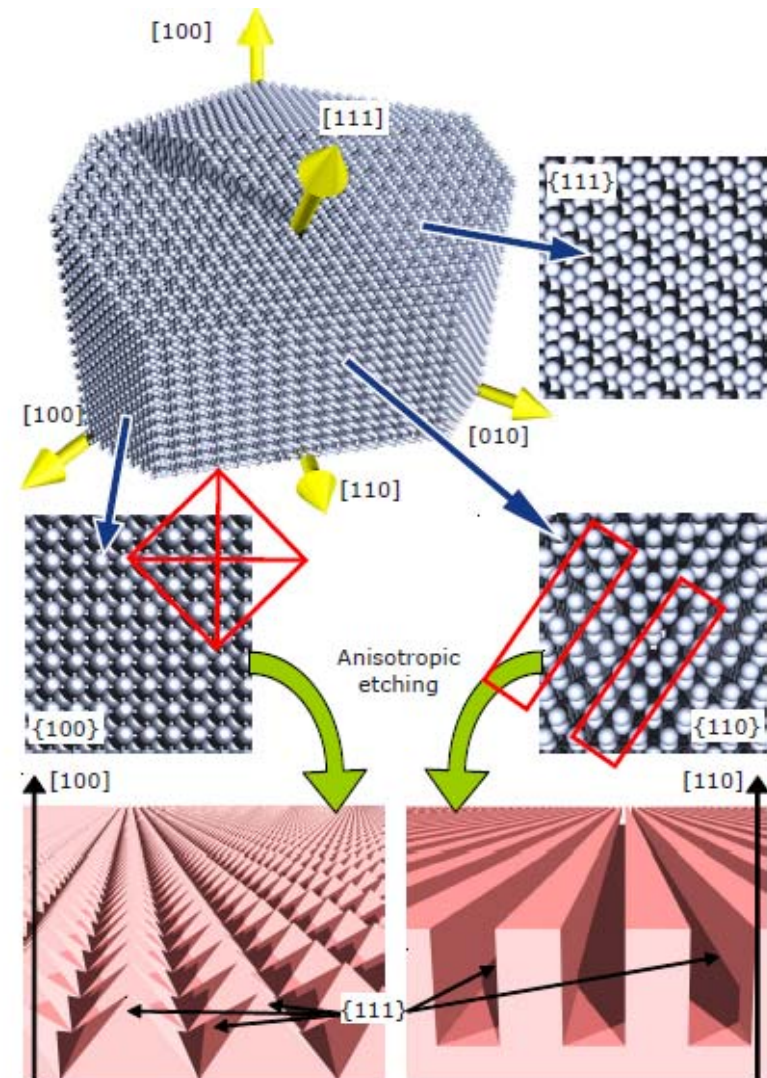
Nagy szelektivitás a hordozóra:

$$S = R_{<100>} / R_{<111>} = 300$$

Marási anizotrópia KOH marószerben



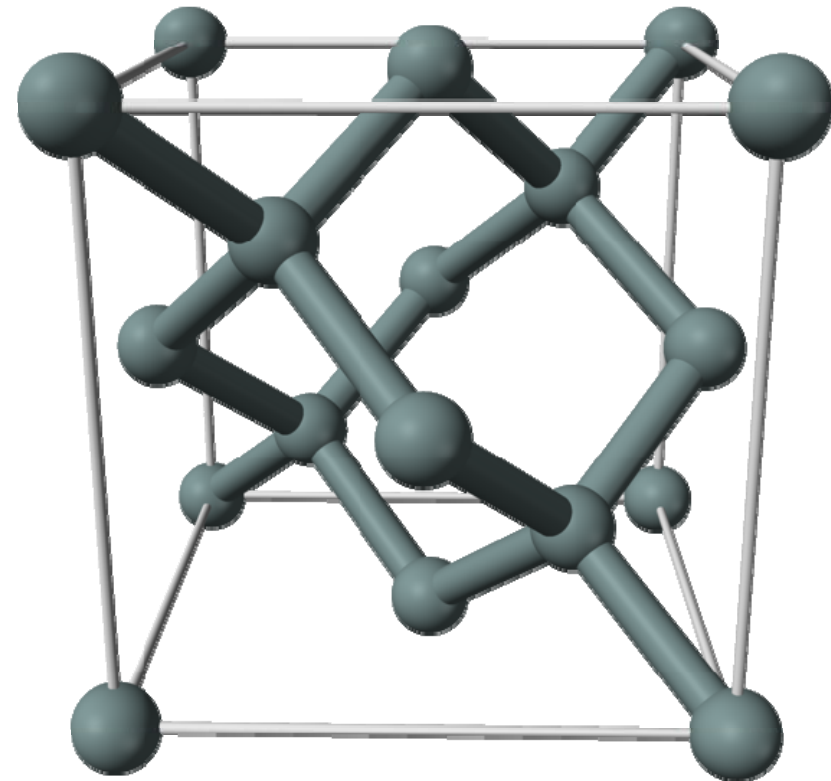
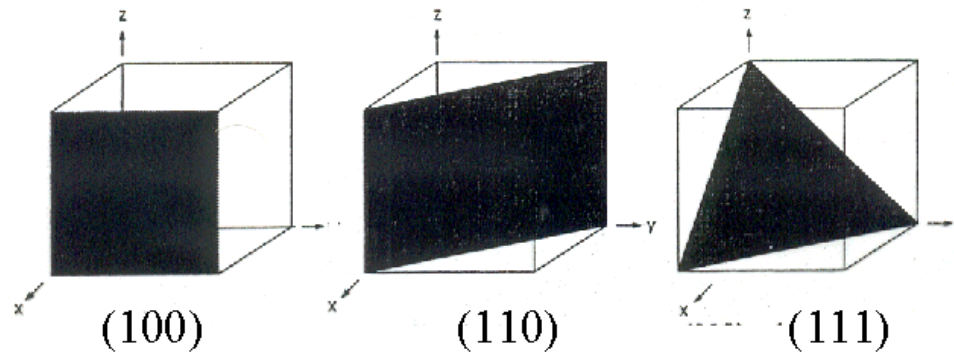
Szelettípus és orientáció is számít!



Marási sebesség irányfüggése

Szilícium rácsszerkezete: gyémántrács

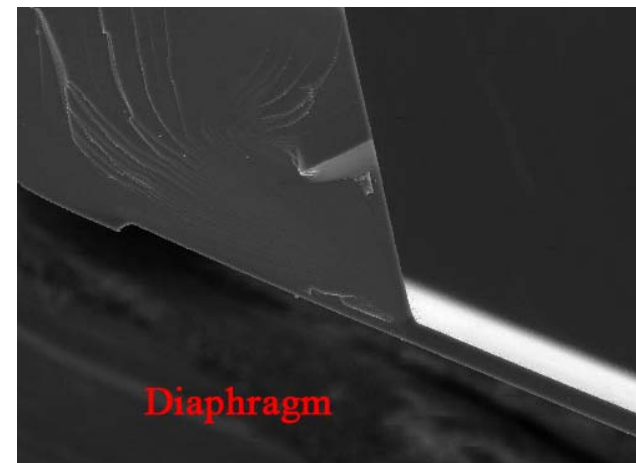
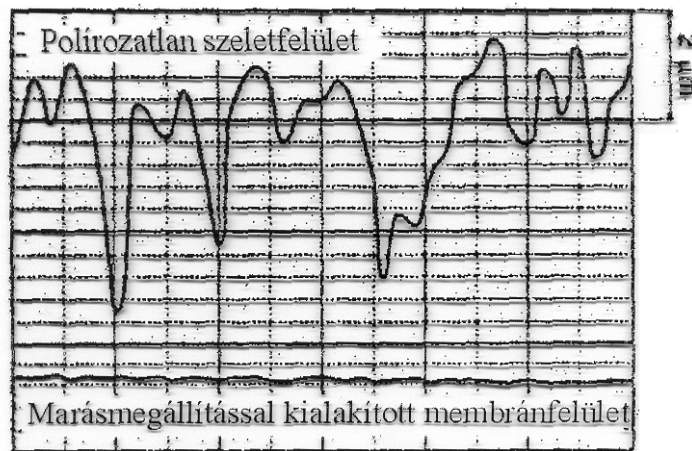
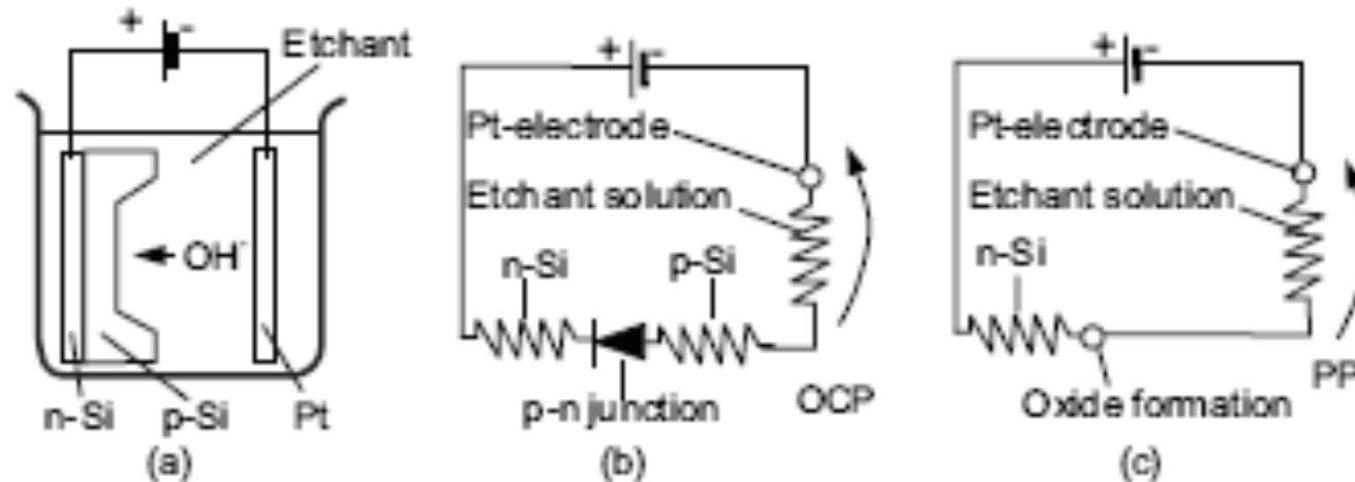
Legegyszerűbb kristálytani síkok:



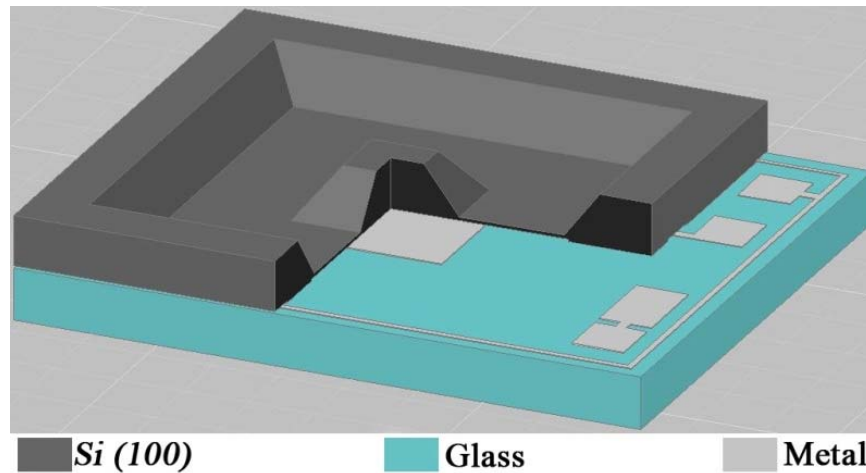
Si-Si kötési energia: $E_{\sigma(\text{SiSi})_{(111)}} \gg E_{\sigma(\text{SiSi})_{(100)}} > E_{\sigma(\text{SiSi})_{(110)}}$

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

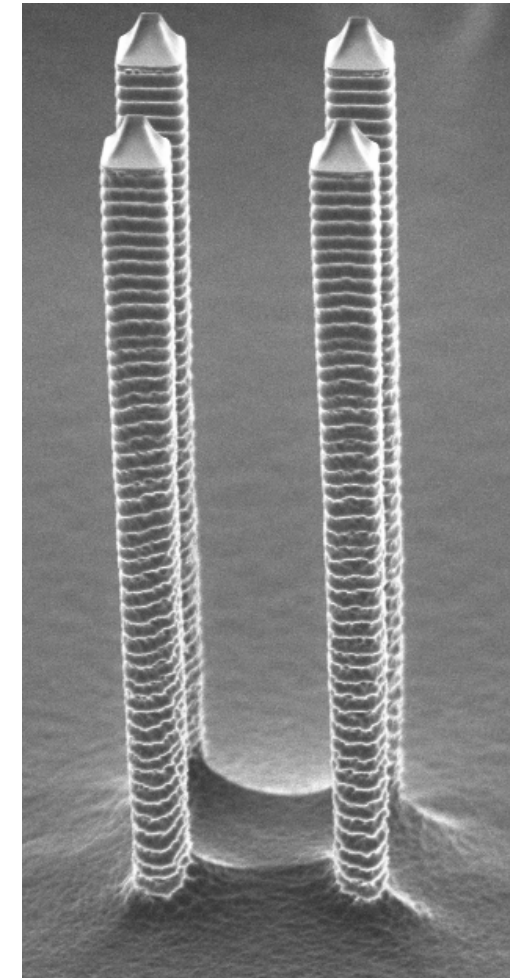
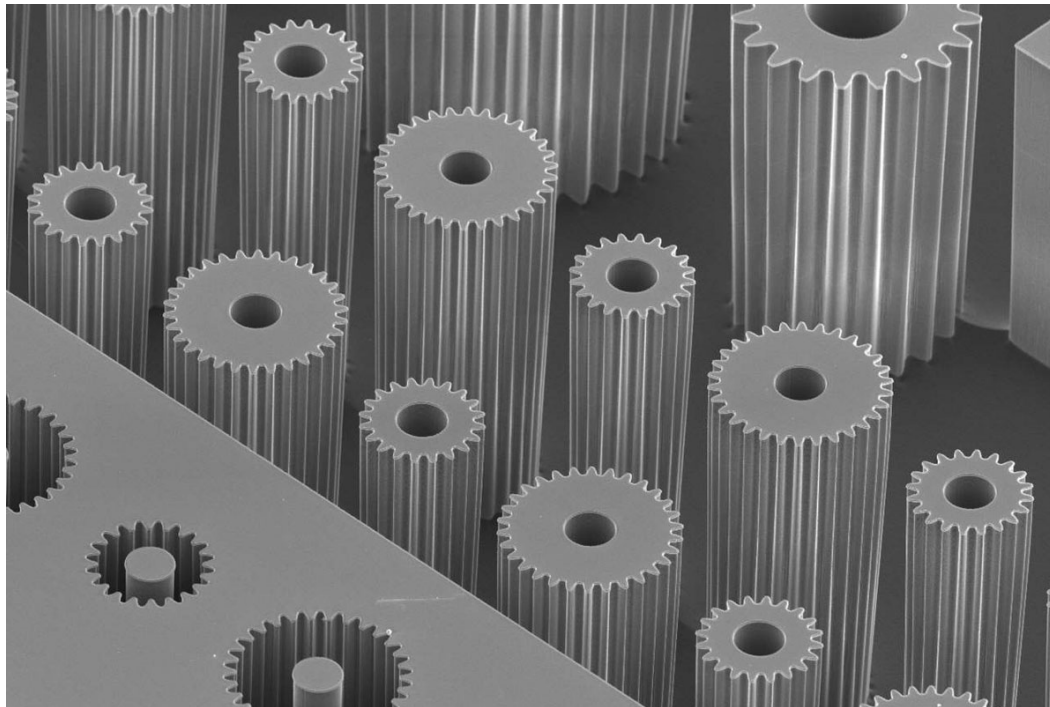
Elektrokémiai marásmegállítás - ECES



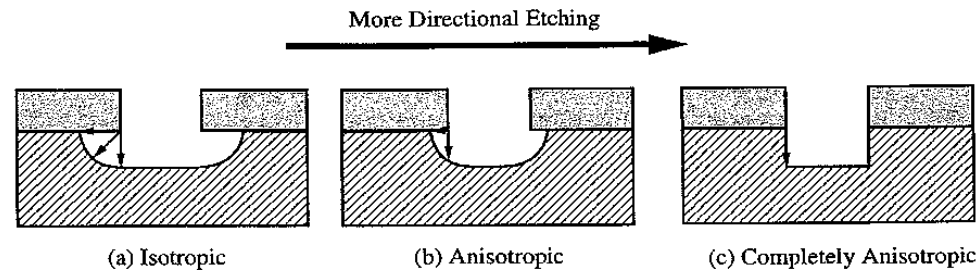
Nyomásmérő szenzor



Szárazmarások



Marások szerepe a mikrotechnológiában



Cél:

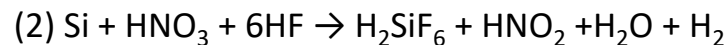
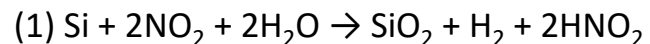
3D struktúra kialakítása

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

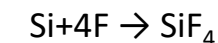
Si nedves kémiai marása: $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ elegyében



Száraz marás

- Gáz fázisú marószerből plazma
- Kémiai és fizikai folyamat

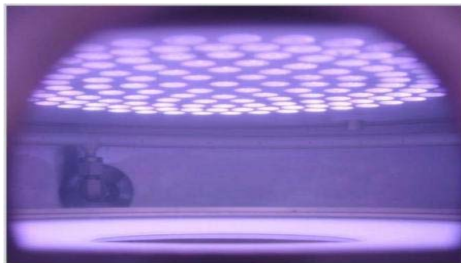
Si száraz marása: halogén alapú plazmákban



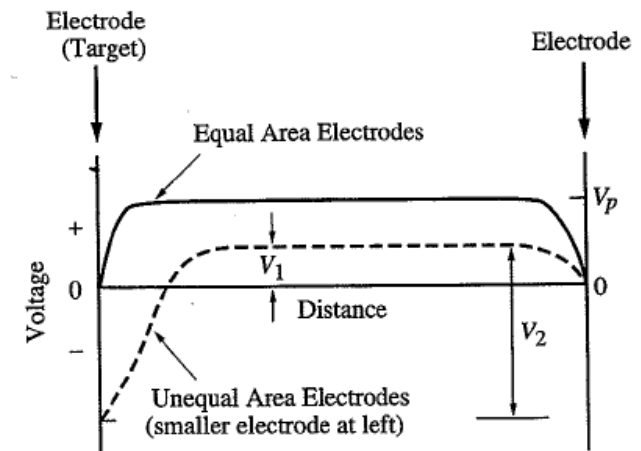
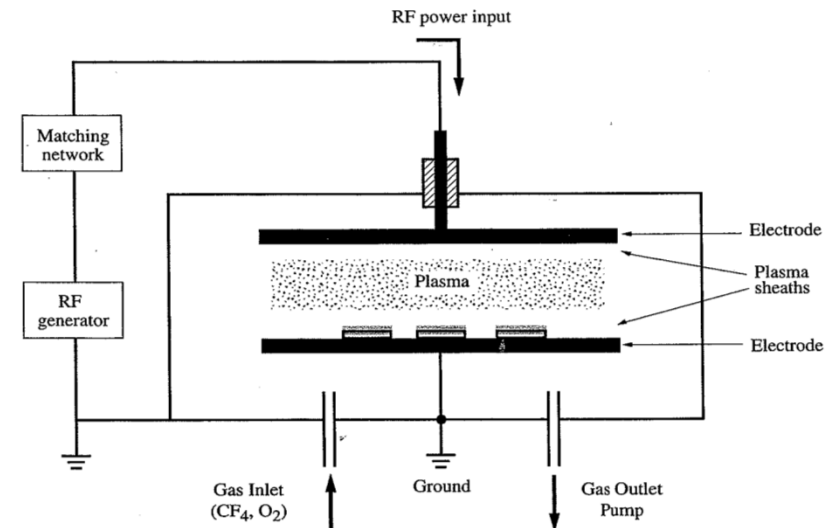
Plazma marások jellemzői

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



Plazma marási mechanizmusok

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

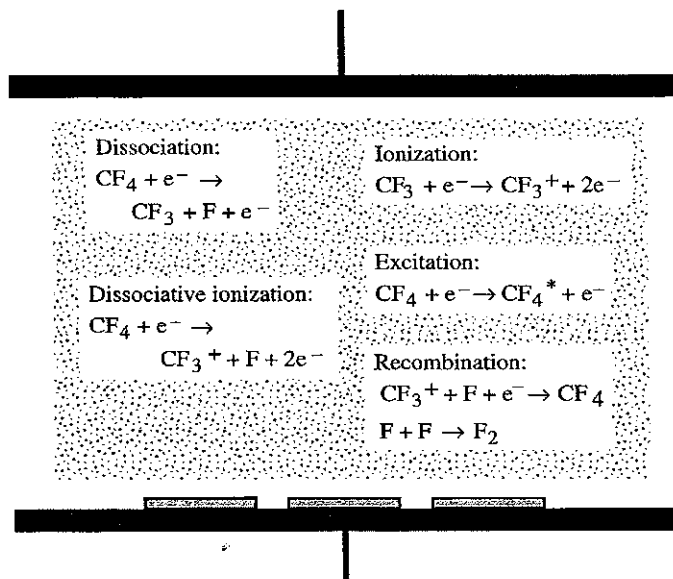


Figure 10-9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

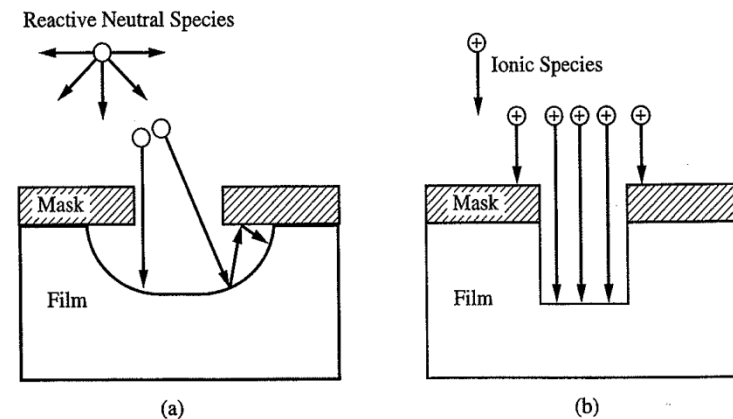
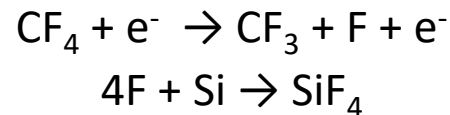


Figure 10-11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient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

Kémiai marás

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



A 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. **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!

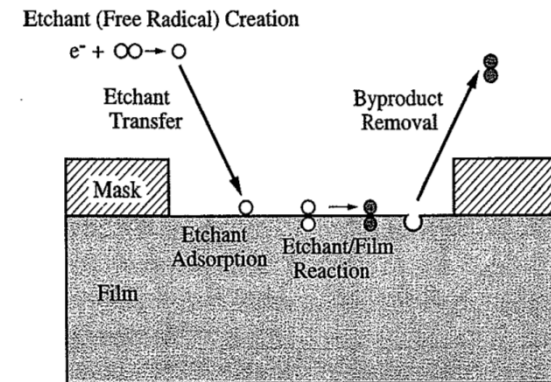


Figure 10-10 Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

Izotróp a marás, mert

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

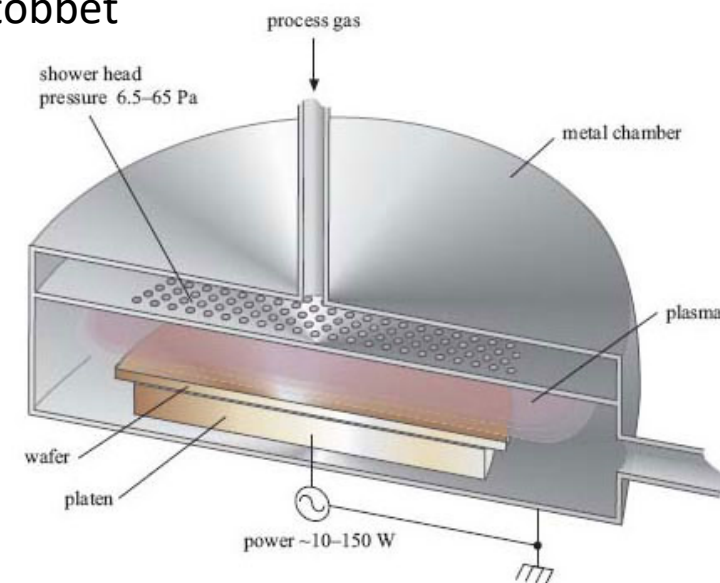
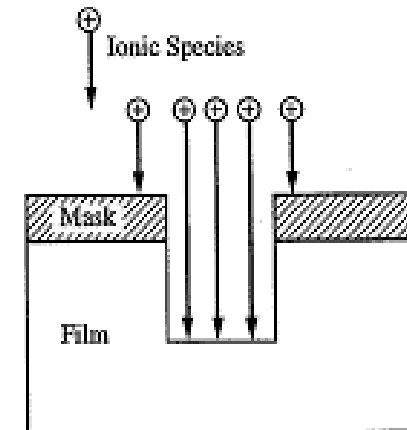
Nagy szelektivitás érhető el

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

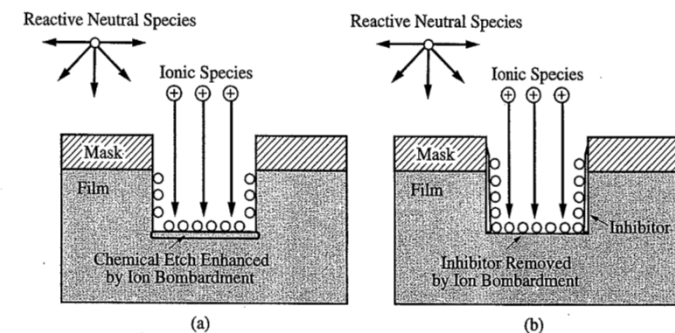
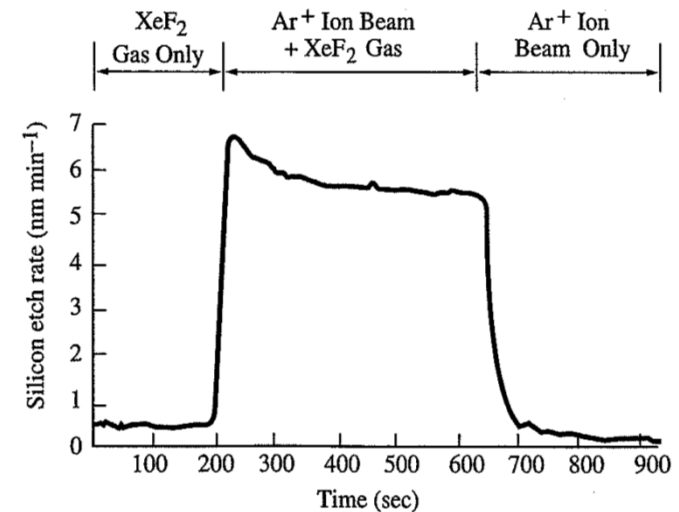


Figure 10-13 Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

Sebességbefolyásoló paraméterek

Nyomás

- Sheath potenciál és ion energia
- Elektron energia
- Ionizált / nem ionizált részecskék aránya és fluxusa
- A magasabb / alacsonyabb rendű kémiai kinetika relatív sebességei
- Fiziszorbcio a felületeken
- Anyagtranszport folyamatok sebességeinek arányai

Hőmérséklet

- Marási sebesség: $\exp(-E_a/kT)$
- Szelektivitás
- Felületi morfológia
- Anizotrópia

Gázáramlási sebesség / plazma teljesítmény: legyen nagy

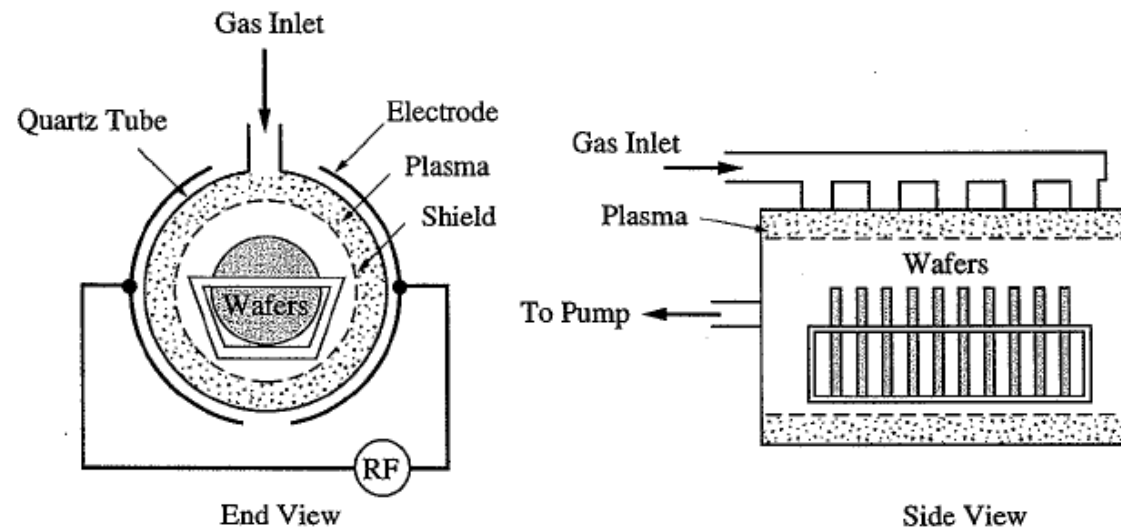
Gerjesztése frekvencia: 13.56 MHz

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

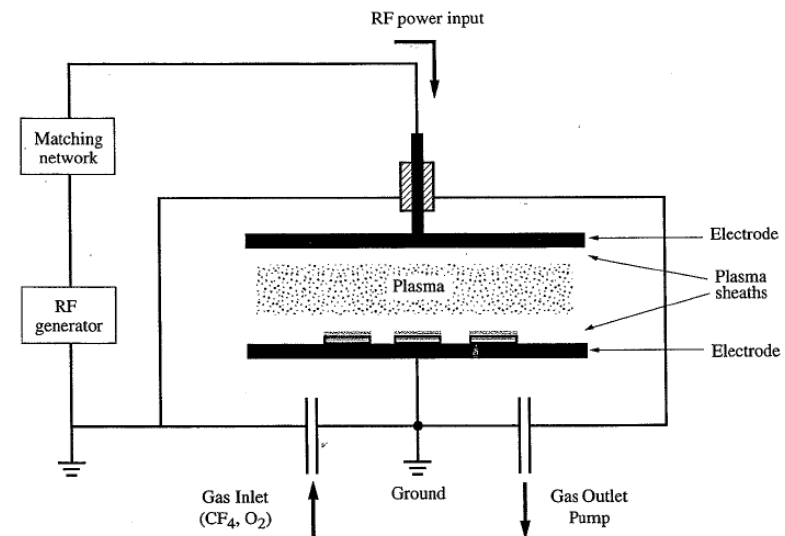


Figure 10-7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

Plazma maró berendezések III.

Sík plazmamaró – RIE (Reactive Ion Etching) mód

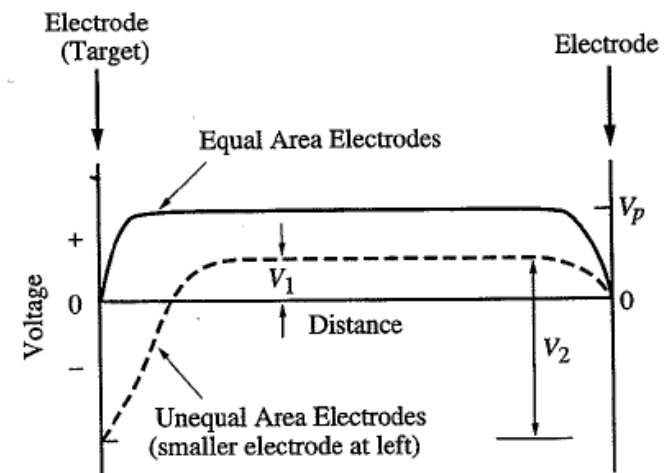
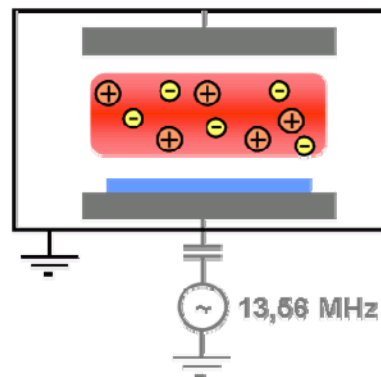
- A szelet a kisebbik elektródán ül, gyakran csak egy szelet
- A nagyobbik a földelt elektróda, csatlakoztatva a kamra falához, jelentősebb a feszültség esés 100-800V tartományban (bias) - ion segített anizotróp marás lehetséges
- kisebb nyomás esetén még irányítottabb a marás, de kisebb a plazma sűrűség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

Példák:

SiO₂: CHF₃

poli-Si, Si₃N₄: SF₆ + O₂, NF₃

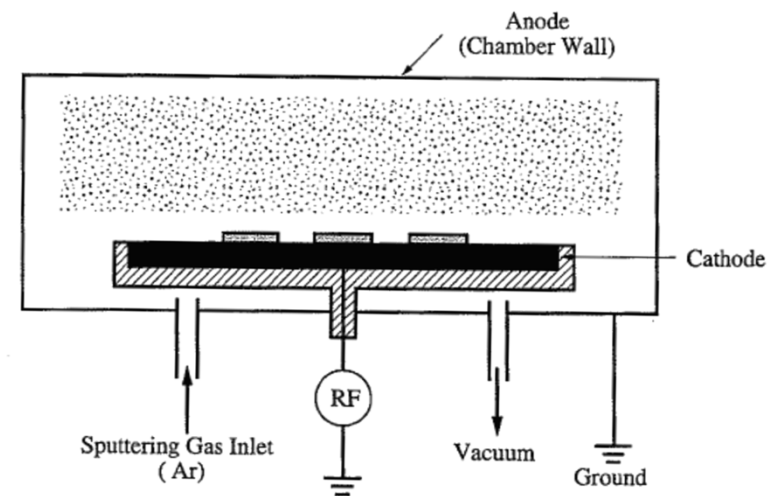
Al: Cl₂, BCl₃



Plazma maró berendezések IV.

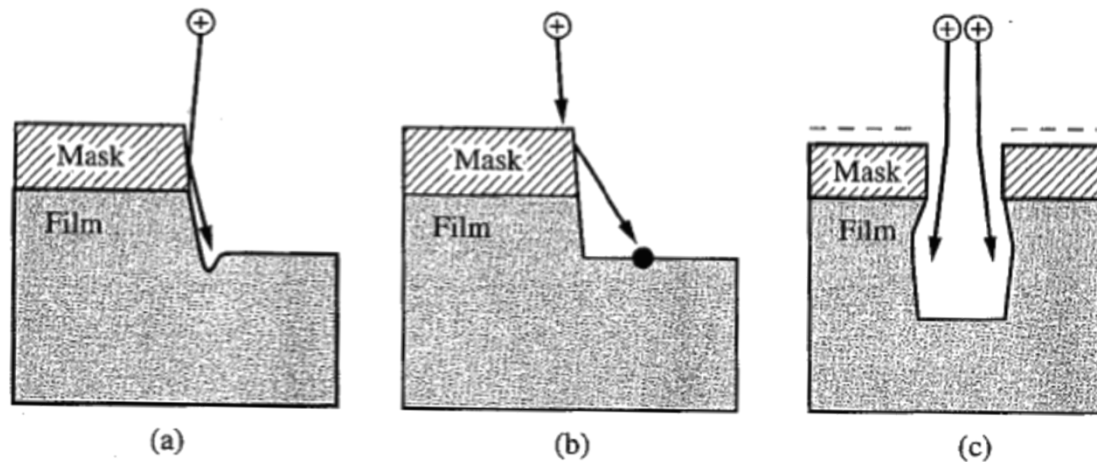
Porlasztás és ion marás (Sputter etching, Ion milling):

- Tisztán fizikai marás
- Kémiaileg inert anyaggal (Ar)
- A szeletek a kisebbik elektródon, az anód a kamra fala
- Teljesen anizotróp, bármely anyag marható,
- Az Ar porlasztási hozama hasonló különböző anyagokra >> nincs szelektivitás



Az ion bombázás hatásai

- Trenching (árok) – a maszk oldalfaláról lepattanó ionok az alsó sarkot marják
- Redeposition (lerakódás) – a kiorlasztott anyagok a mart területen lerakódnak
- Rácshibák keltése – kilök, implantál atomokat a felszín alá
- Radiation damage – e^- csapdák keltése gate oxidban
- Felület töltődése + image force – a maszk vagy a szelet feltöltődése az ionok eltérüléséhez vezethet



Plazma maró berendezések V.

HDPE - High Density Plasma Etching



Plazma maró berendezések V.

HDPE - High Density Plasma Etching

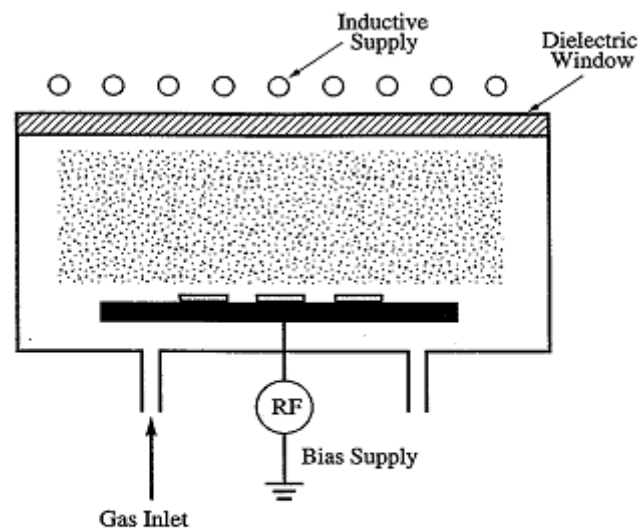


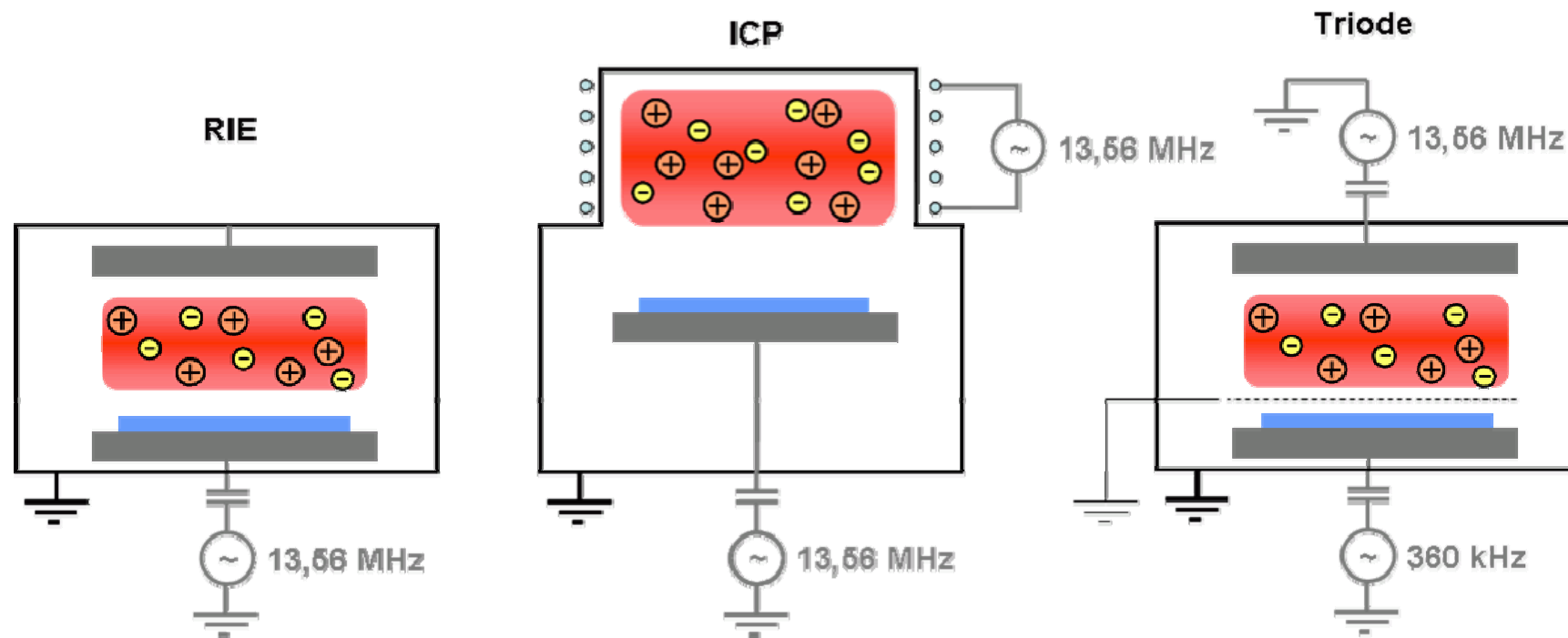
Figure 10-16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **Plazma sűrűség és ion energia** egymástól függetlenül
- ECR vagy ICP* 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!

* ECR: Electron Cyclotron Resonance, ICP: Inductively Coupled Plasma

Plazma maró konfigurációk



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

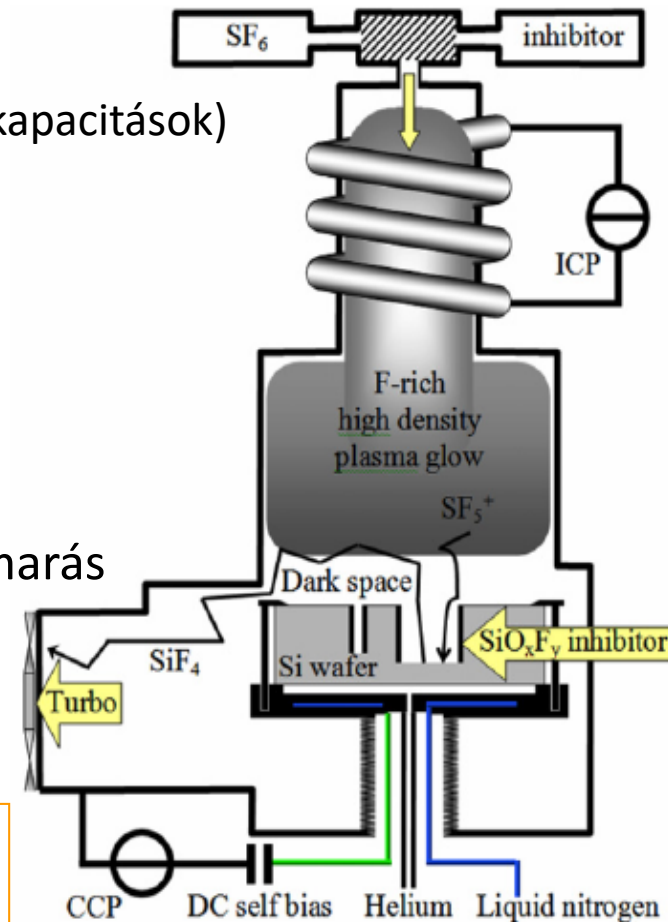
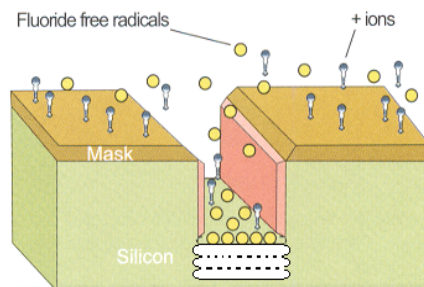
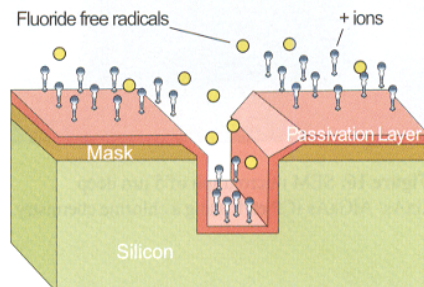
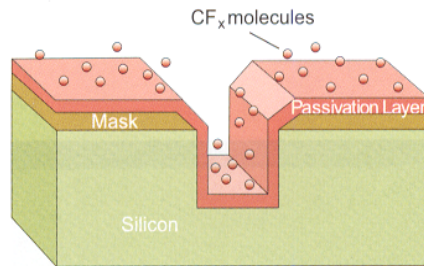


Figure 1. A dual source DRIE system.

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



DRIE Cryo vs Bosch

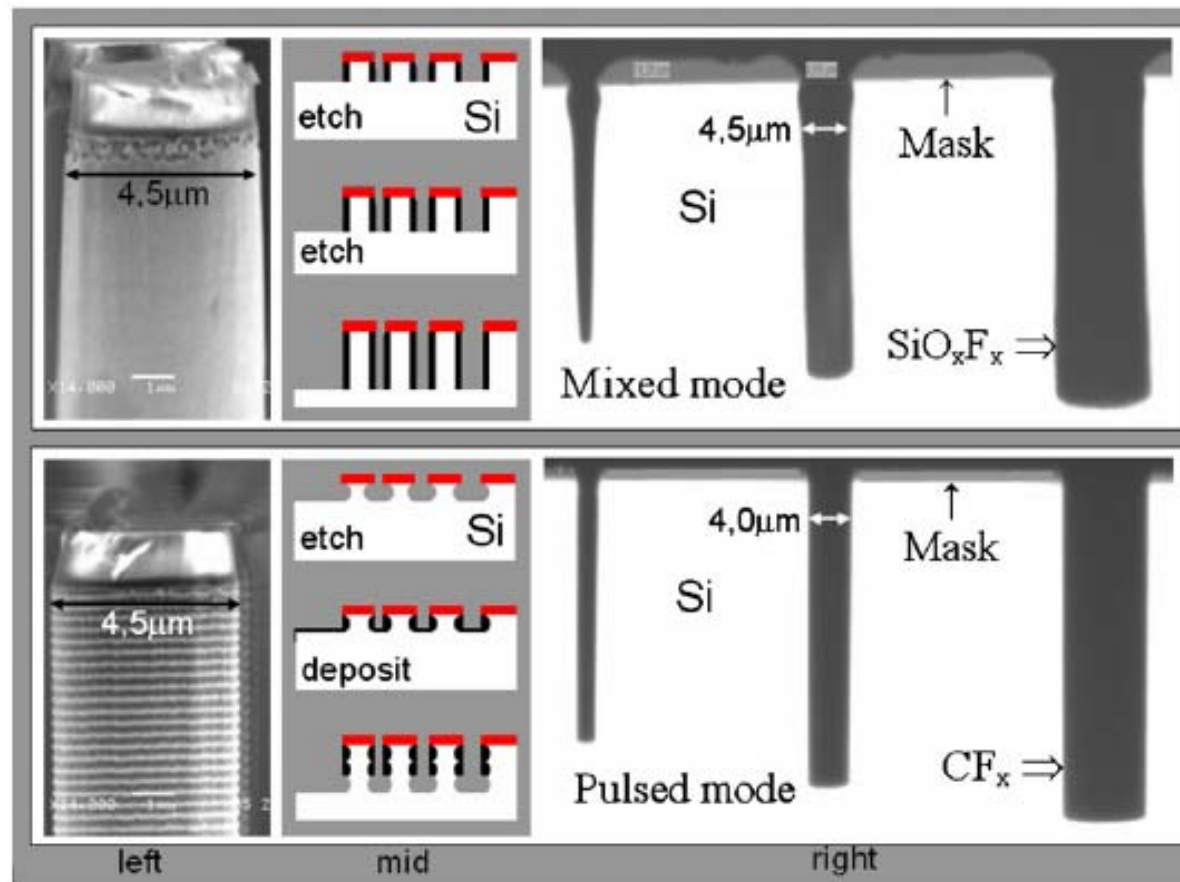


Figure 3. Cross-sectional views of trenches etched in mixed-mode versus pulsed-mode DRIE.

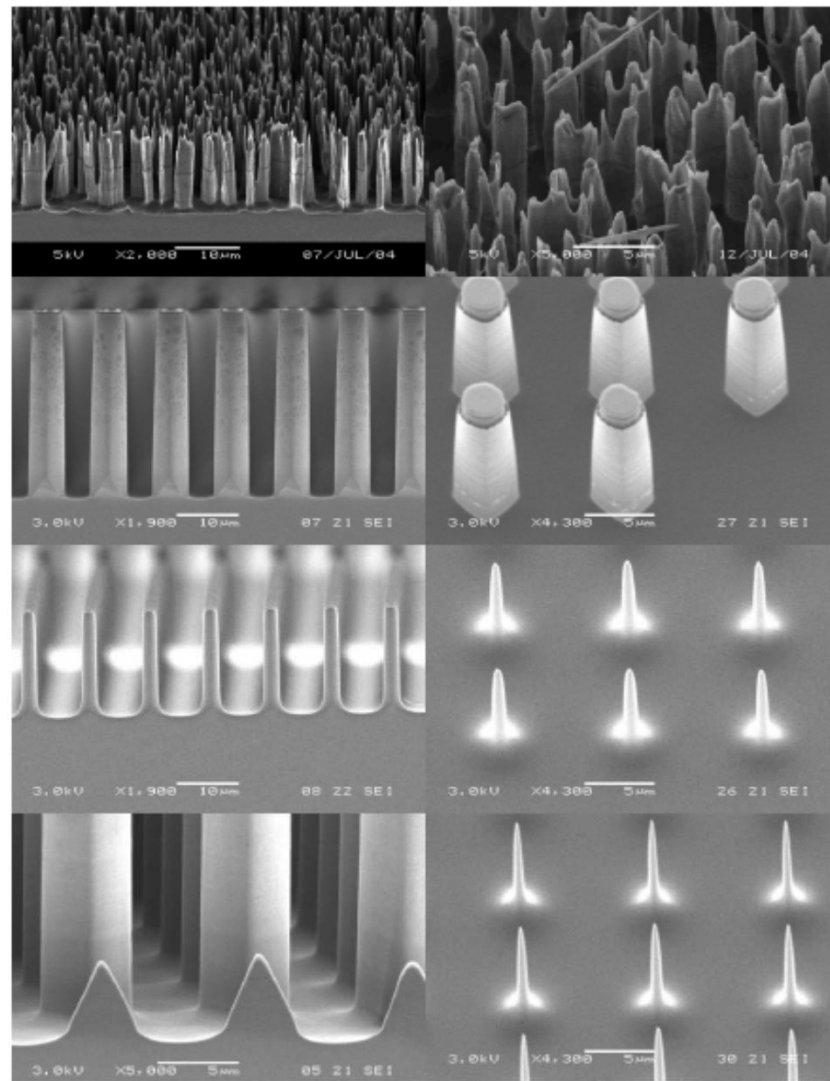


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

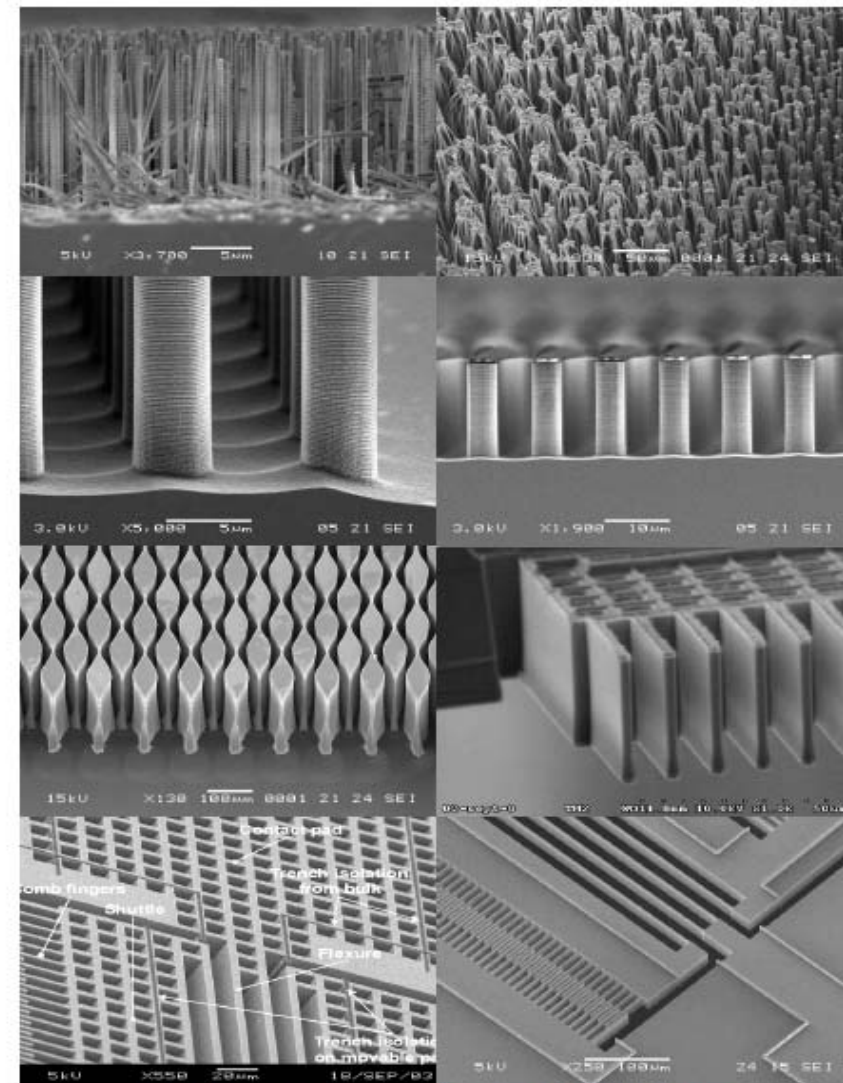


Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).

Plazma marás - összegzés

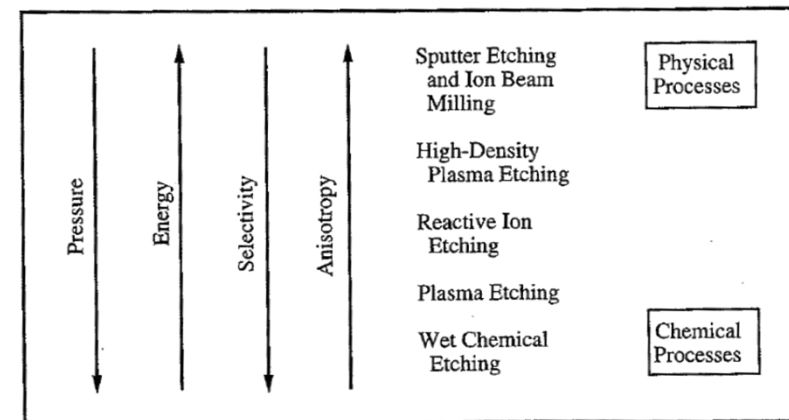
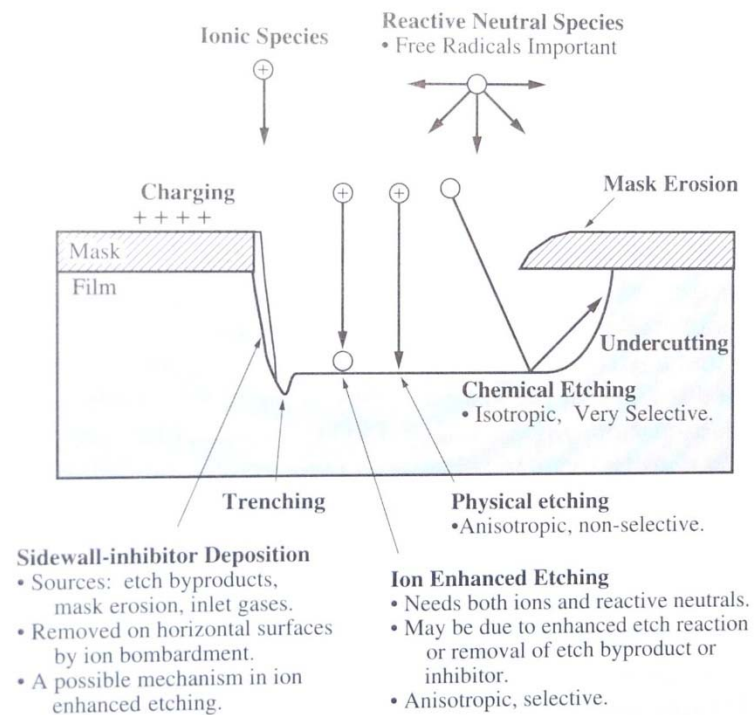


Figure 10-19 Summary of trends of different etch systems.

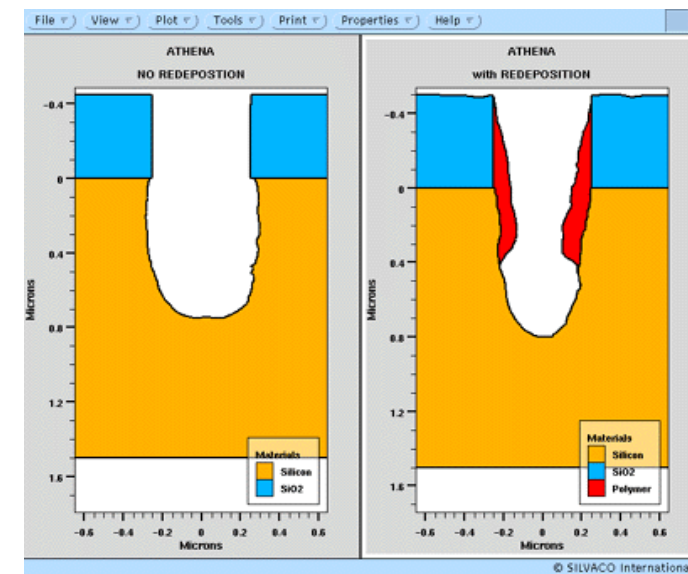
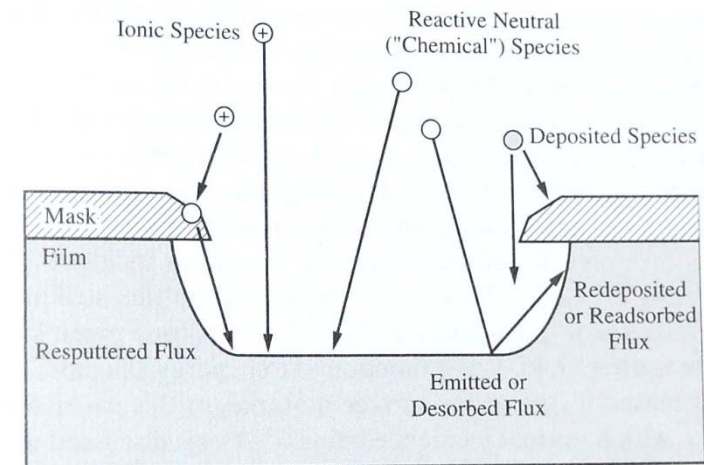
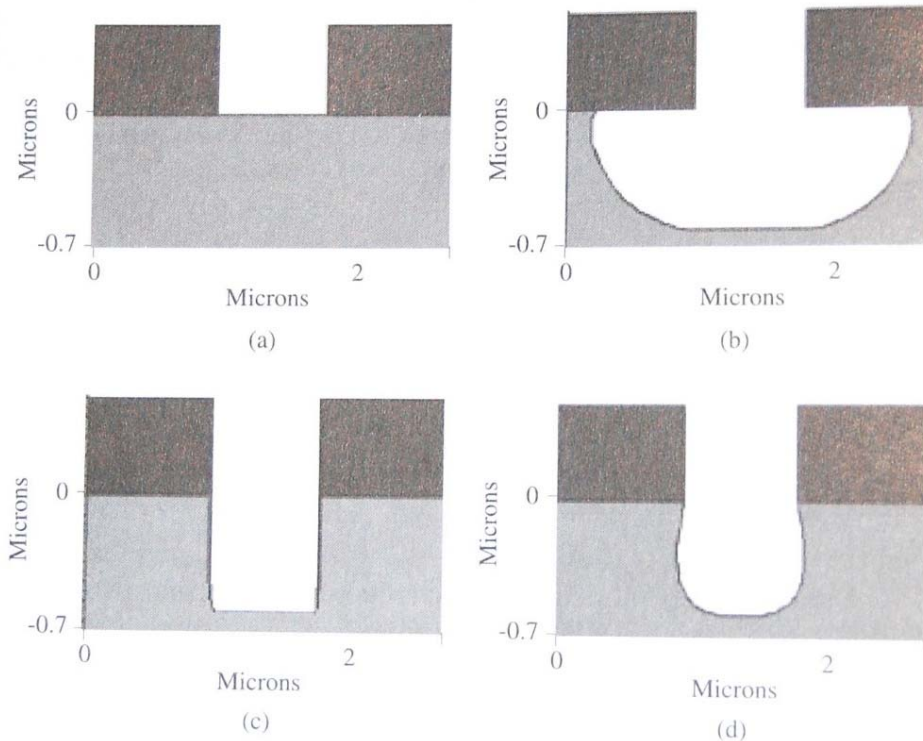
Plazma marás - összegzés

Table 10-3. Typical or representative plasma etch gases for films used in IC fabrication (After [10.1, 10.4, 10.13, 10.14].)

Material	Etchant	Comments
Polysilicon	CF ₄	Isotropic or near isotropic (significant undercutting); fair to no selectivity over SiO ₂ .
	CF ₄ /H ₂	Very anisotropic; nonselective over SiO ₂ .
	CF ₄ /O ₂ /SF ₆	Isotropic or near isotropic; good selectivity over SiO ₂ .
	HBr, Cl ₂ , Cl ₂ /HBr/O ₂	Very anisotropic; most selective over SiO ₂ .
Single-crystal Si	same etchants as polysilicon	
SiO ₂	SF ₆ , NF ₃ , CF ₄ /O ₂ , CF ₄	Can be near isotropic (significant undercutting); anisotropy can be improved with higher ion energy and lower pressure; poor or no selectivity over Si.
	CF ₄ /H ₂ , CHF ₃ /O ₂ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈	Very anisotropic; selective over Si.
Si ₃ N ₄	CHF ₃ /C ₄ F ₈ /CO	Anisotropic; selective over Si ₃ N ₄ .
	CF ₄ /O ₂	Isotropic; selective over SiO ₂ but not over Si.
	CF ₄ /H ₂	Very anisotropic; selective over Si but not over SiO ₂ .
	CHF ₃ /O ₂ , CH ₂ F ₂	Very anisotropic; selective over Si and SiO ₂ .
Al	Cl ₂	Near isotropic (significant undercutting).
	Cl ₂ /CHCl ₃ , Cl ₂ /N ₂	Very anisotropic; BCl ₃ often added to scavenge oxygen.
W	CF ₄ , SF ₆	High etch rate; nonselective over SiO ₂ .
	Cl ₂	Selective over SiO ₂ .
Ti	Cl ₂ , Cl ₂ /CHCl ₃ , CF ₄	
TiN	Cl ₂ , Cl ₂ /CHCl ₃ , CF ₄	
TiSi ₂	Cl ₂ , Cl ₂ /CHCl ₃ , CF ₄ /O ₂	
Photoresist	O ₂	Very selective over other films

Technológia modellezés

Topográfia modell – pl. Silvaco Athena



Ellenőrző kérdések

- 1. Milyen követelményeket támasztunk a Si nedves kémiai marásához használt marószerekkel szemben?
- 2. Mi a marási anizotrópia fogalma?
- 3. Mutasson példát arra, hogyan függ a marási anizotrópia a szelet orientáltságától KOH marószer esetén!
- 4. Ismertesse a Si izotróp marásának mechanizmusát HF/HNO₃ tartalmú marószer esetén!
- 5. Ismertesse a Si anizotróp marásának mechanizmusát lúgos (KOH) marószer esetén!
- 6. Hogyan függ a lúgos marás mechanizmusa a szubsztrát adalékoltóságától?
- 7. Mi az elektrokémiai marásmegállítás (ECES)?
- 8. Mire alkalmazható a pórusos szilícium?
- 9. Ismertesse egy tipikus száraz maráshoz használt kamra felépítését és a plazma kialakulásának fizikai feltételeit!
- 10. Ismertesse a száraz maráskor lejátszódó kémiai marási mechanizmus jellemzőit!
- 11. Ismertesse a száraz maráskor lejátszódó fizikai marási mechanizmus jellemzőit!
- 12. Miért különbözik egy nagy sűrűségű plazmát előállító berendezés határfoka egy közönséges sík plazmamaróétól?
- 13. Hasonlítsa össze a száraz és nedves kémiai marási eljárásokat a szelektivitás és az anizotrópia szempontjából!
- 14. Mit nevezünk terhelési effektusnak reaktív ionmarás során?
- 15. Ismertesse a mély reaktív ionmaró berendezés (DRIE) ún. Bosch marási folyamatát!

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

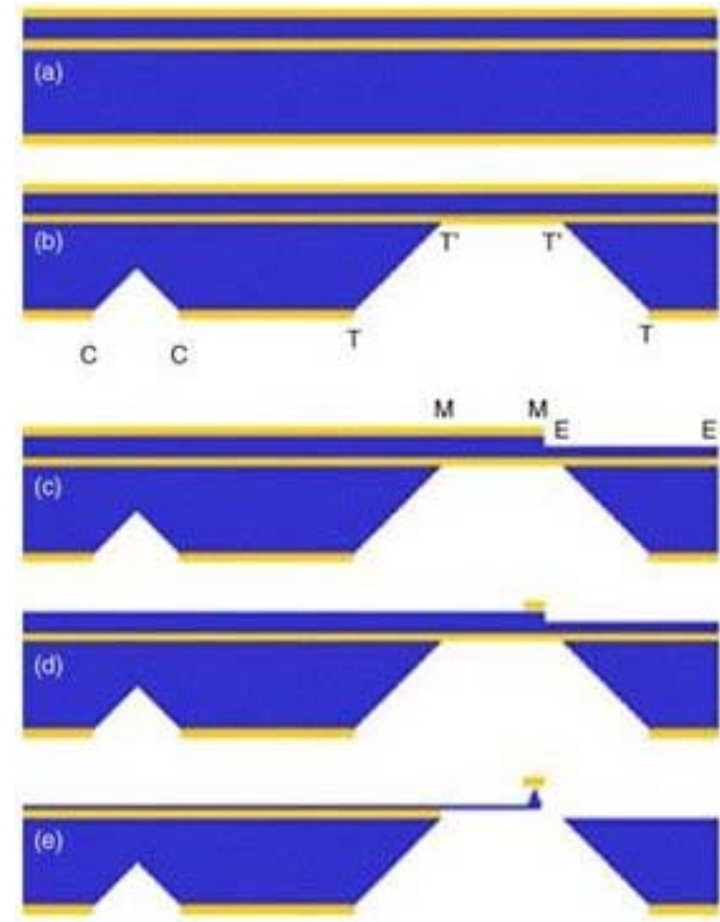
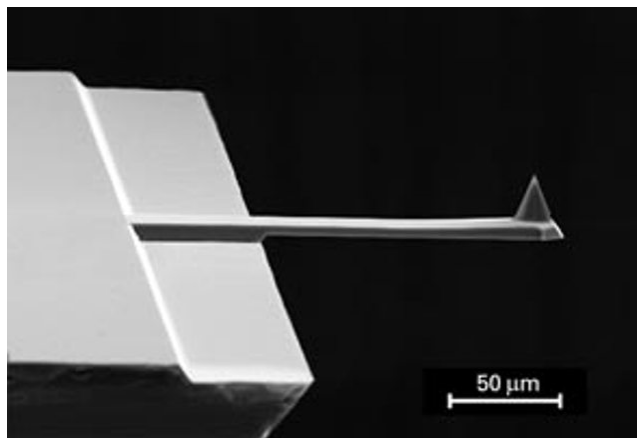
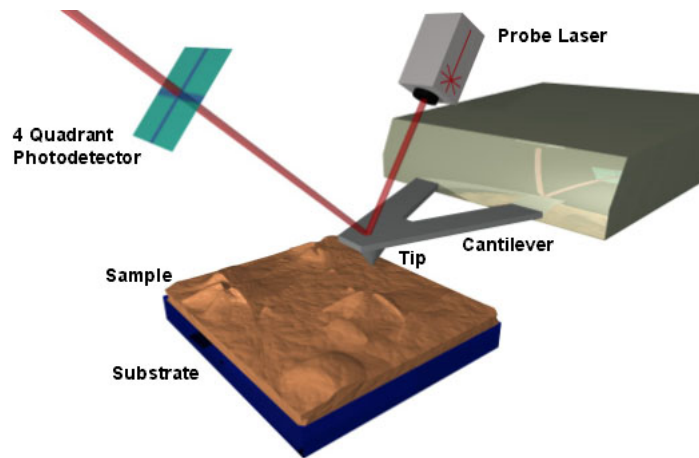
2014 IPHONE 6

Szenzor Hub:

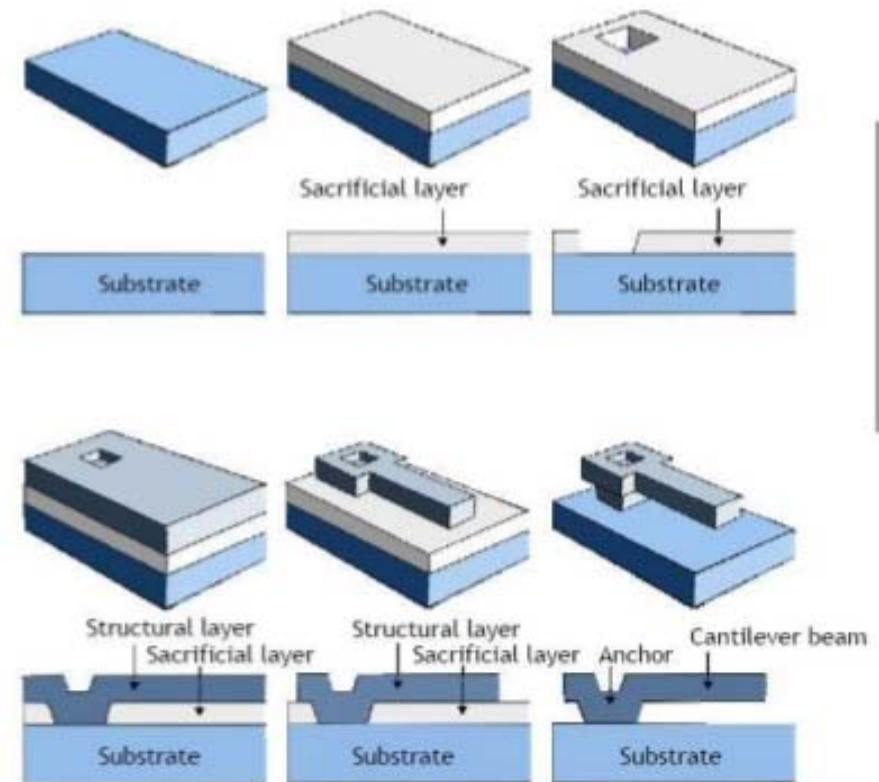
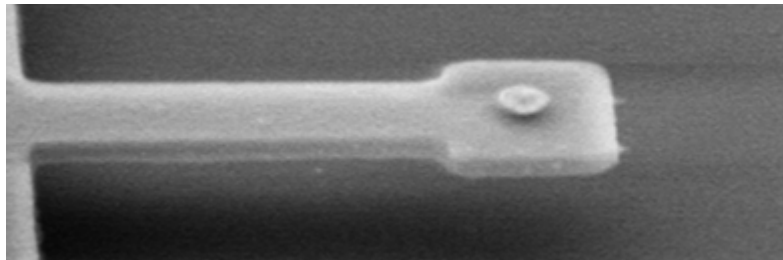
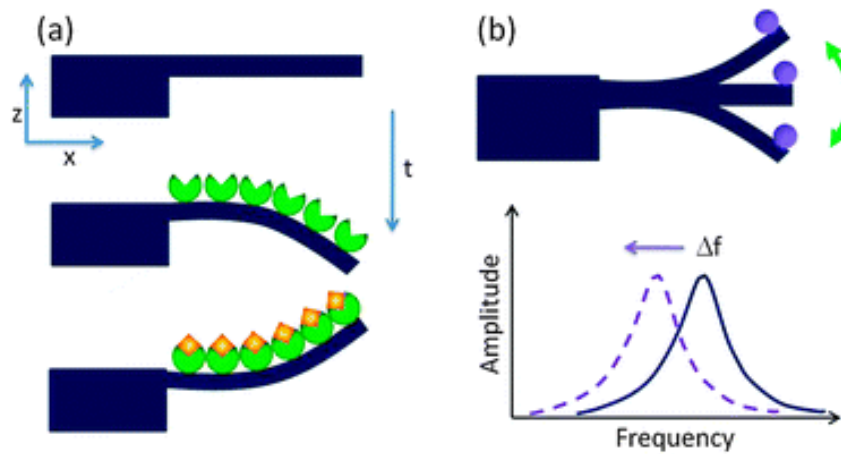
- Nyomás
- 6 tengelyű gyorsulásmérő
- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

KONZOL

KONZOL – TÖMBI MIKROMECHANIKA



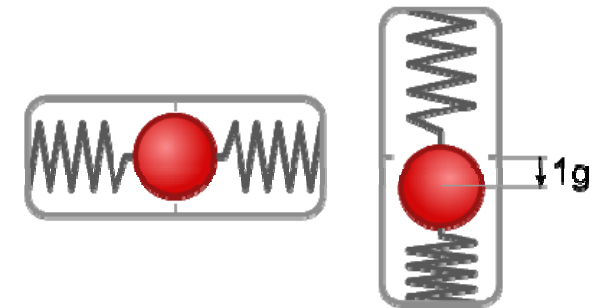
KONZOL FELÜLETI MIKROMECHANIKA



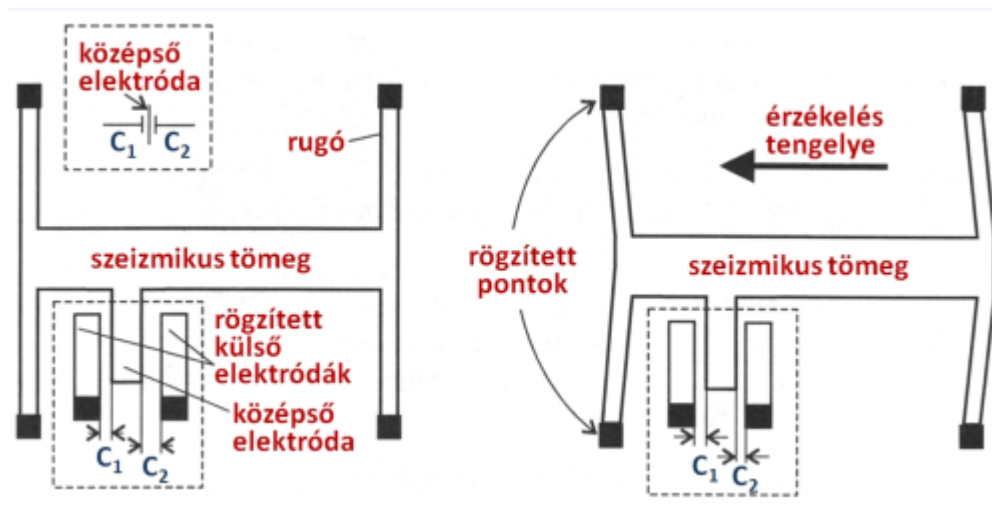
COMB DRIVE / GIRO

GYORSULÁS - GIRO

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése



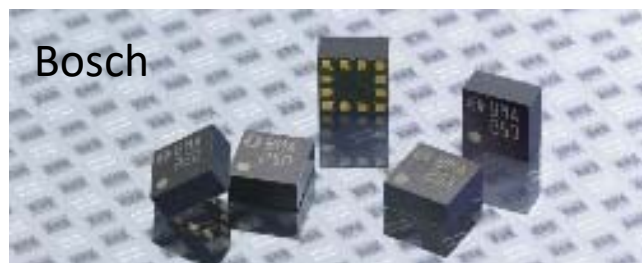
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



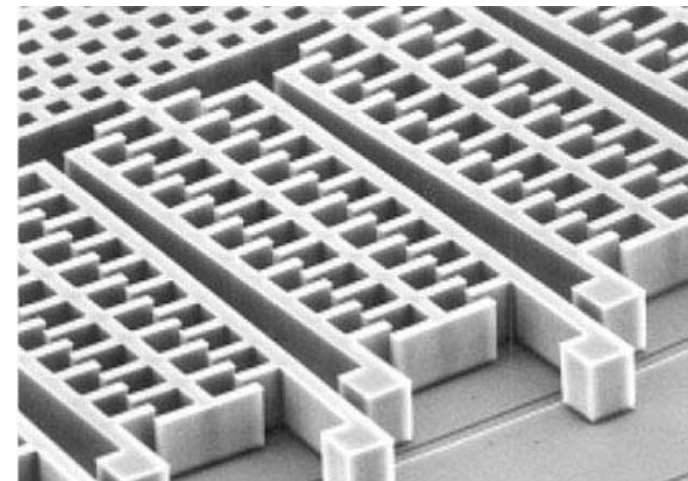
Párhuzamos elektródájú (síkkondenzátor) elrendezésben az érzékenység kis elmozdulások esetén:

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

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

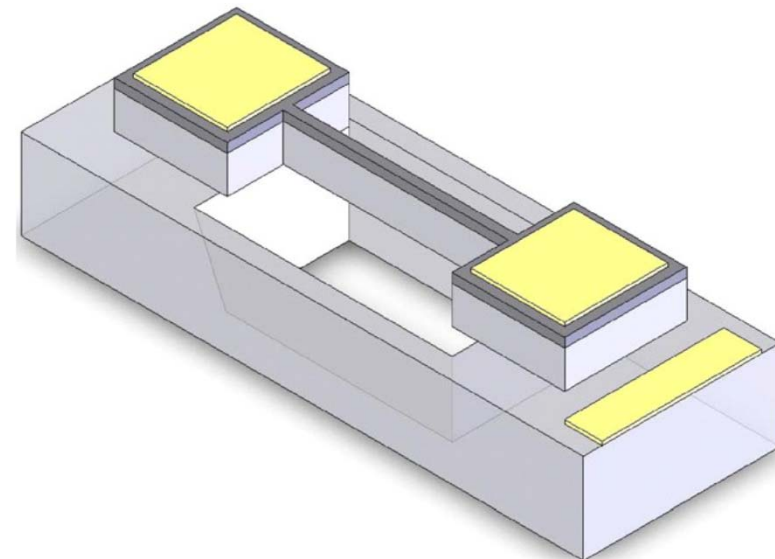
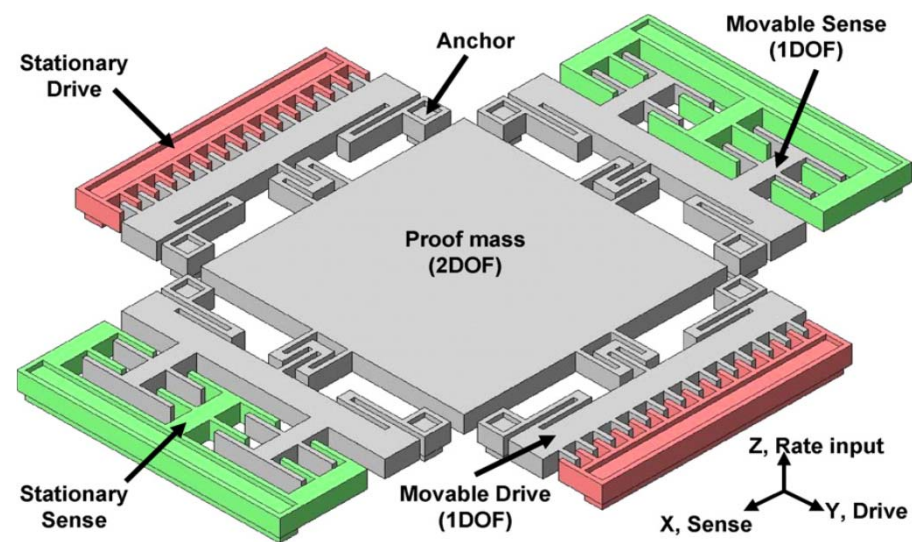


Bosch

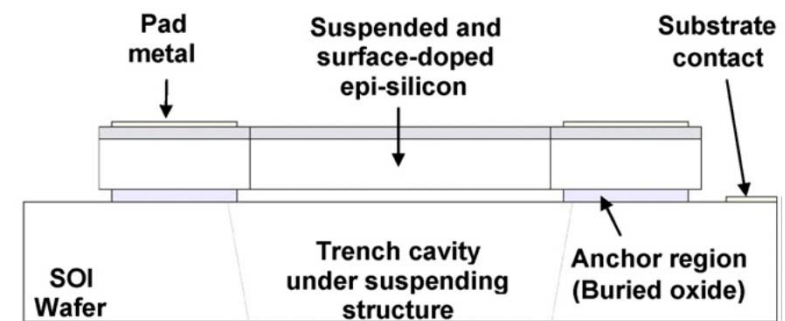
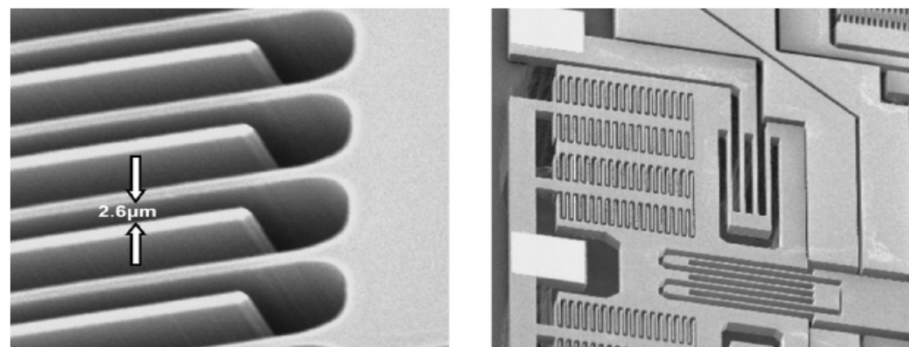


GIRO – TÖMBI MIKROMECHNAIKA

SOI



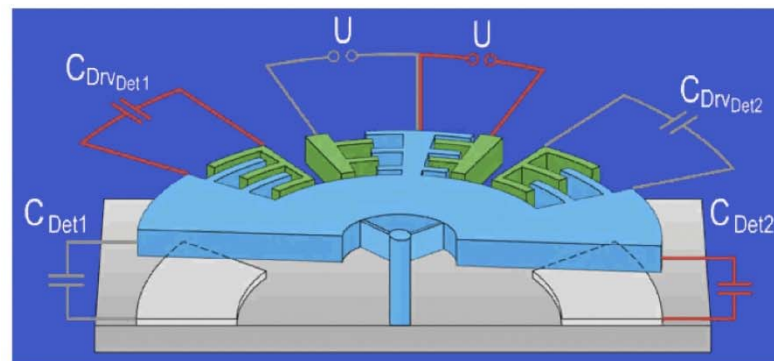
(a)



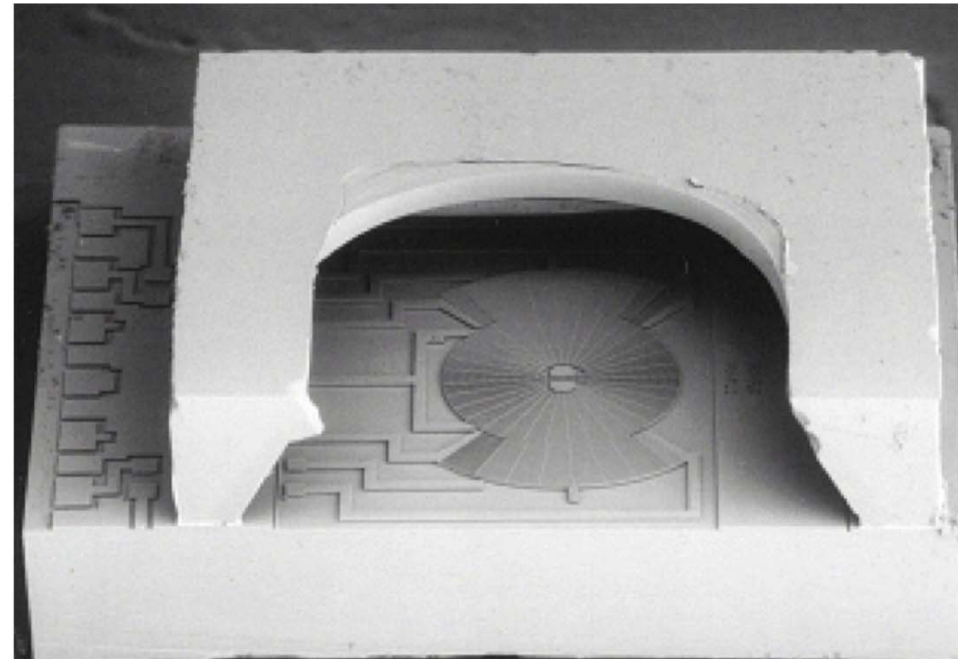
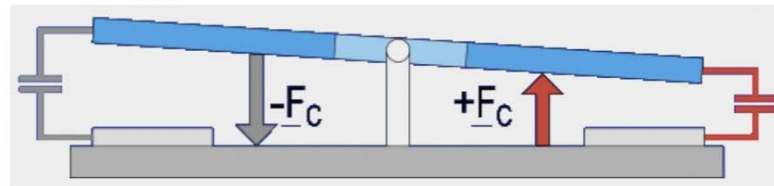
(b)

GIRO – FELÜLETI MIKROMECHNIKA

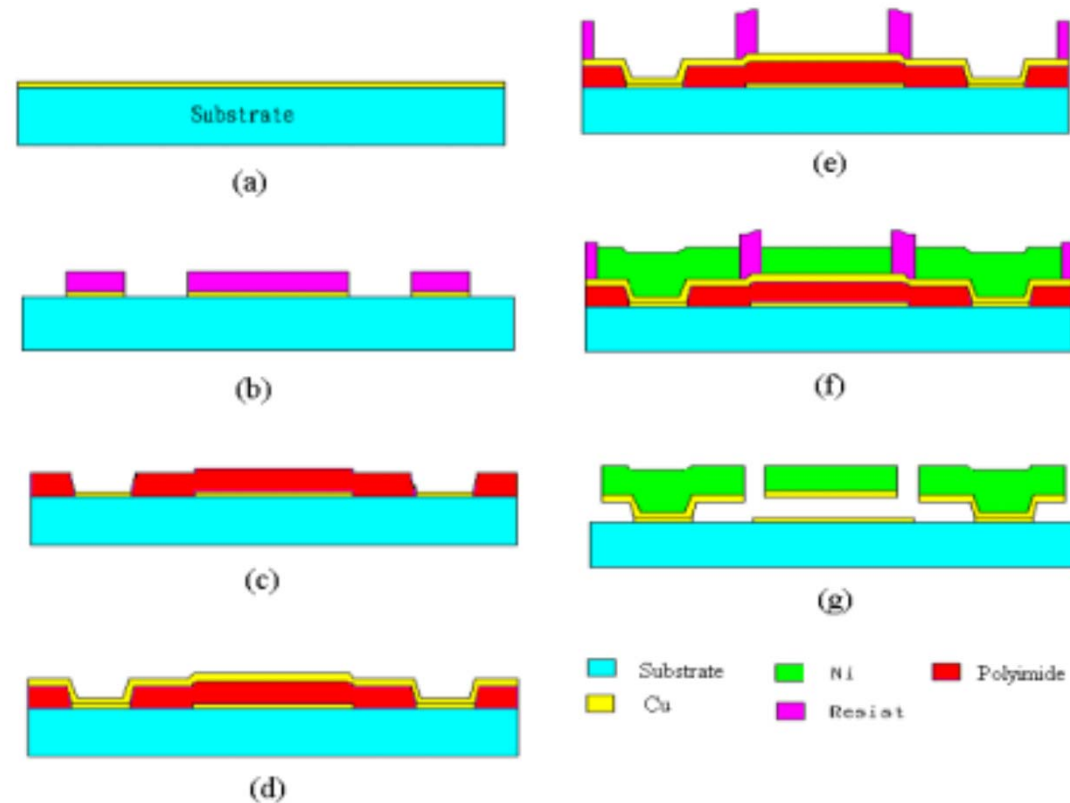
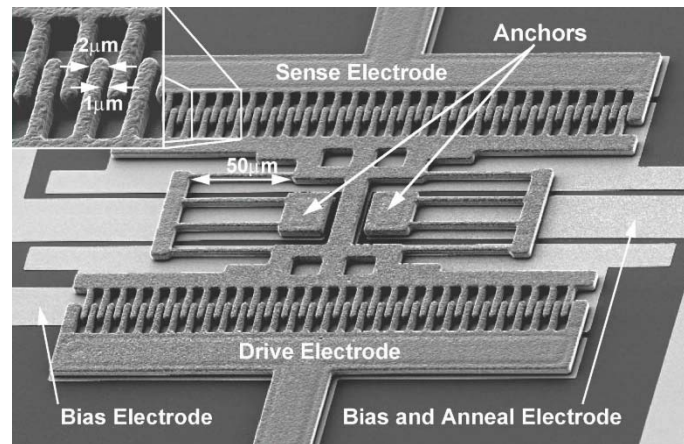
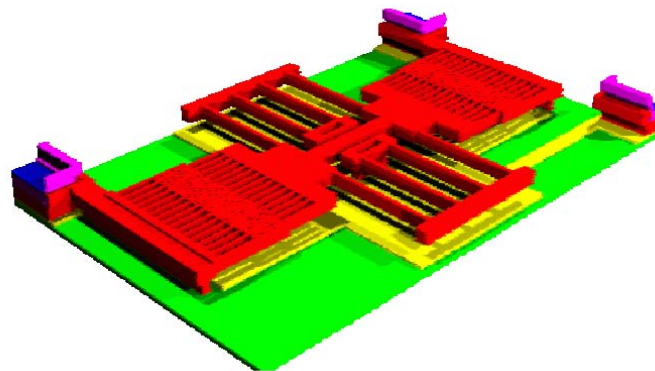
SOI



Drive mode



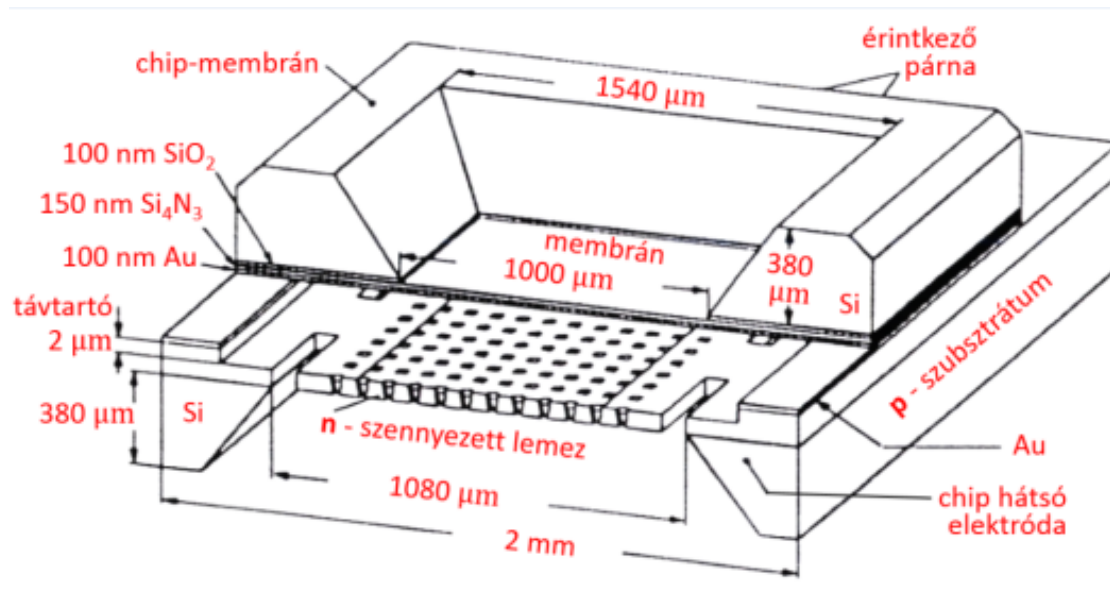
COMB DRIVE – FELÜLETI MIKROMECHANIKA



MIKROFON

MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



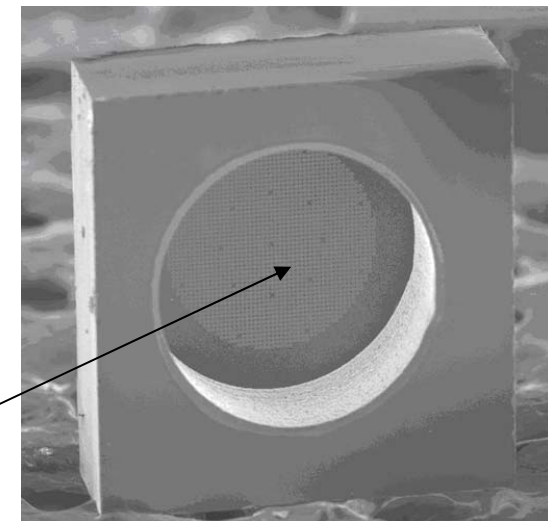
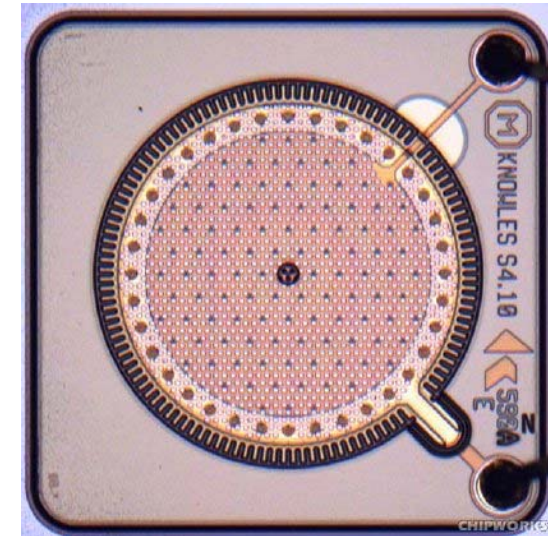
Felső elektróda: Au SiO₂ / SiN_x membránon

Alsó elektróda: nSi

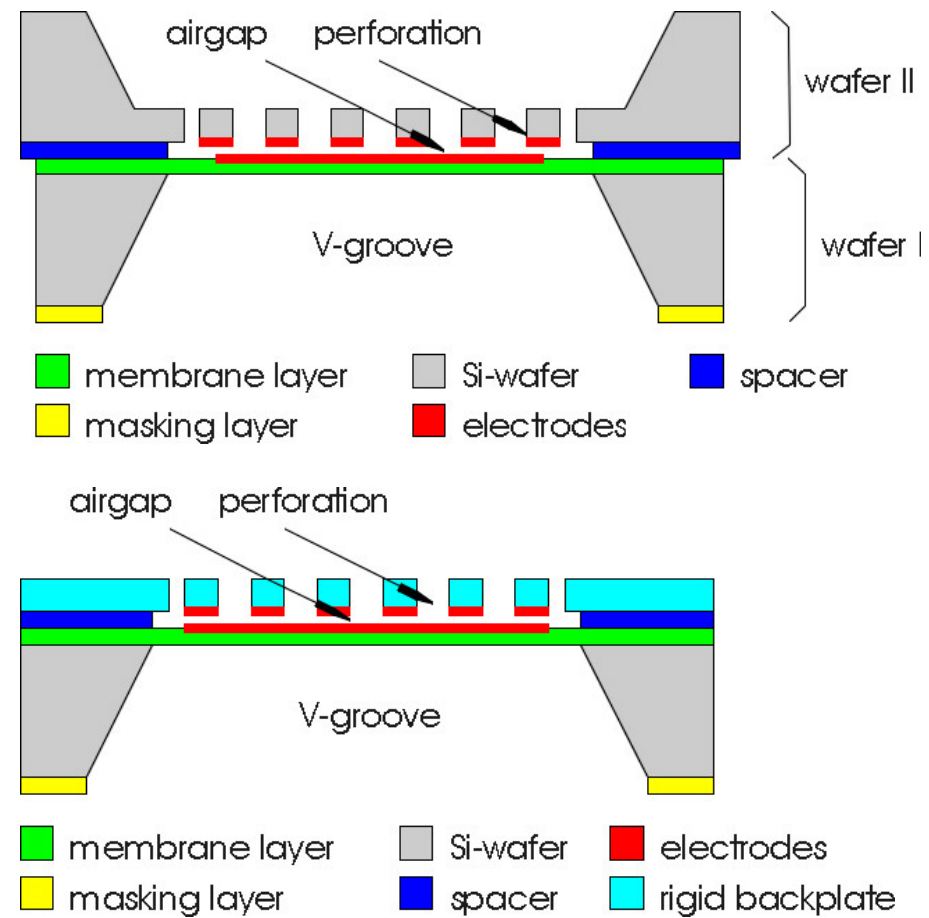
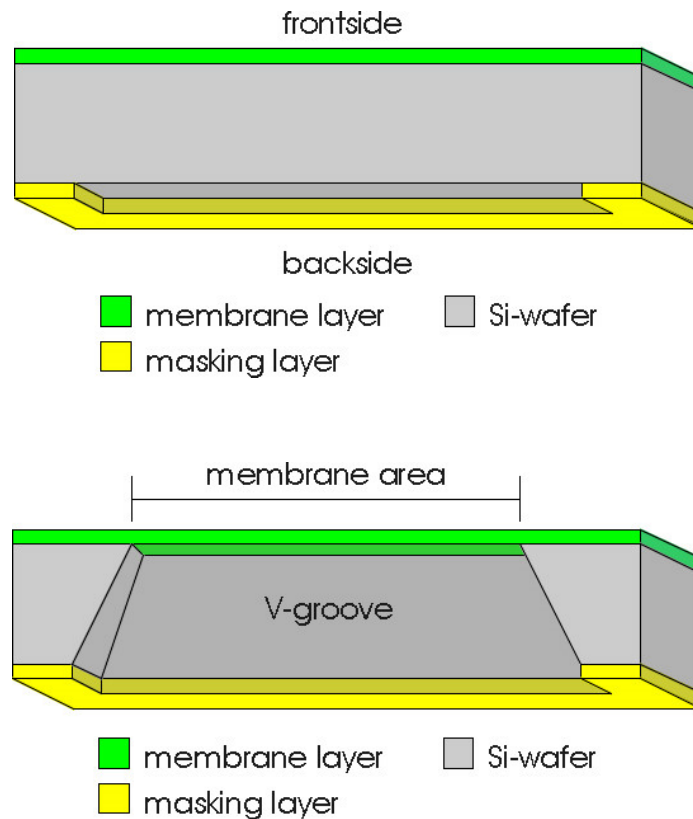
$$C_o = \epsilon \frac{A}{d}$$

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

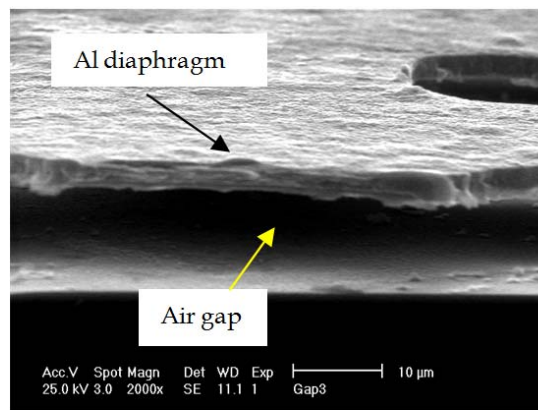
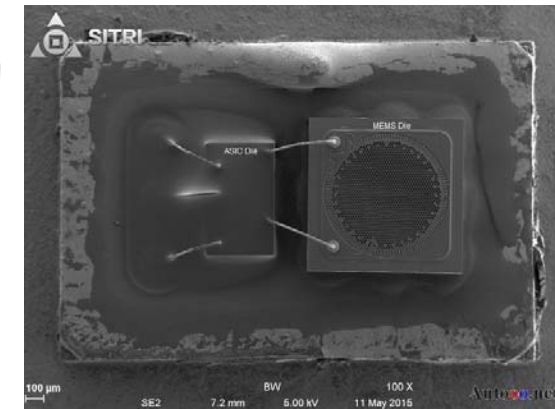
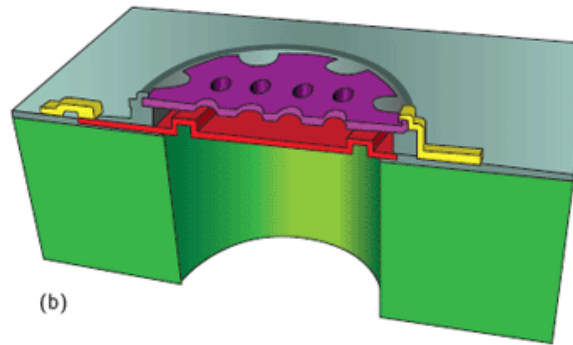
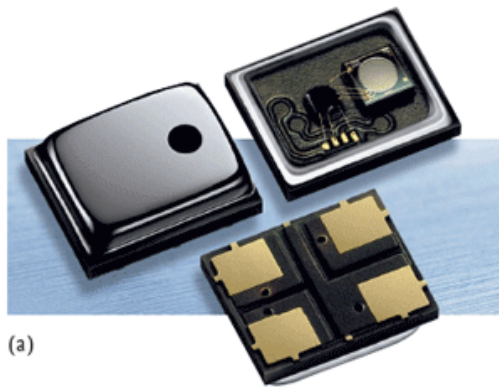
DRIE (mély reaktív ionmarással) mart membrán



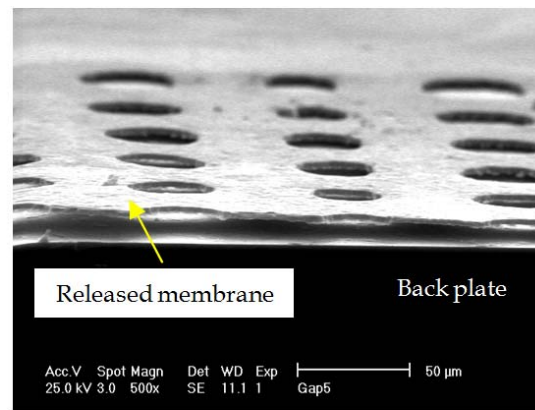
MIKROFON – TÖMBI MIKROMECHANIKA - KOH



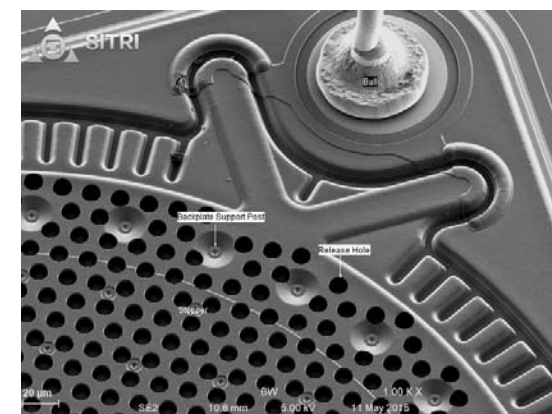
MIKROFON - TÖMBI/FELÜLETI KOMBO



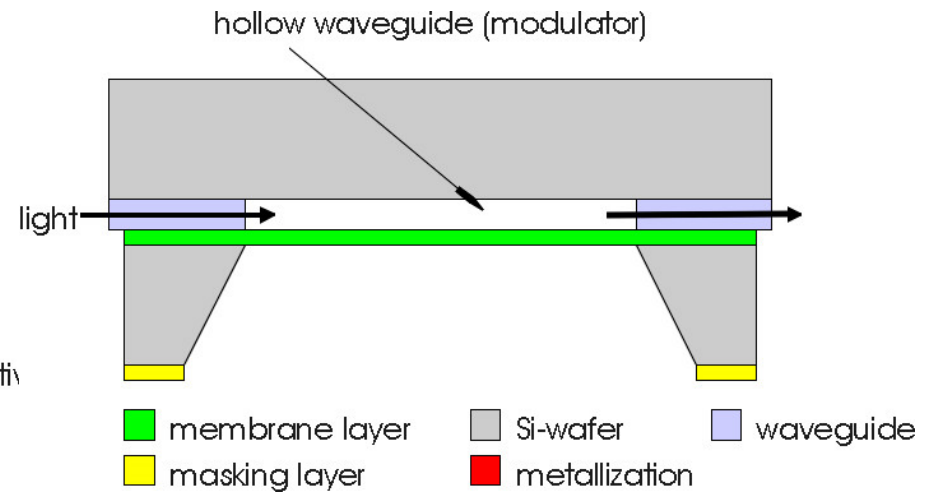
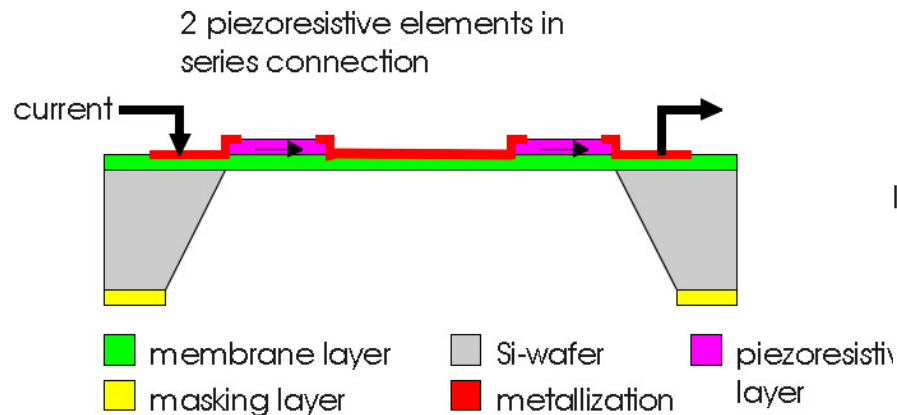
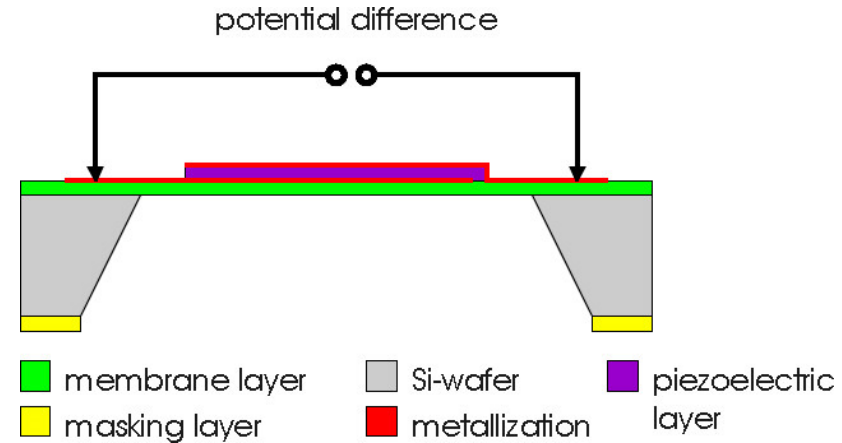
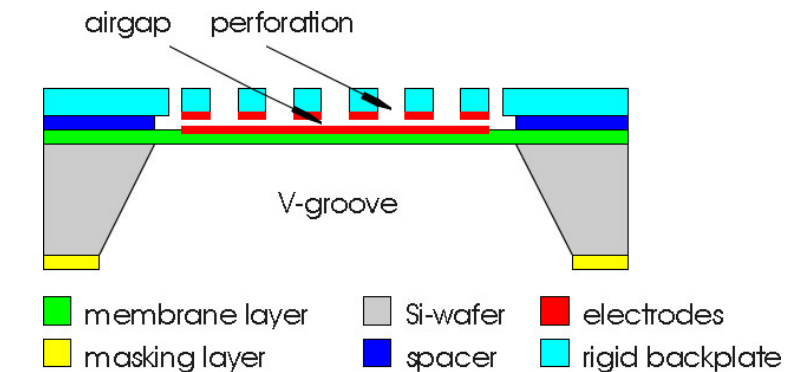
(a) Air gap of microphone



(b) Released membrane structure

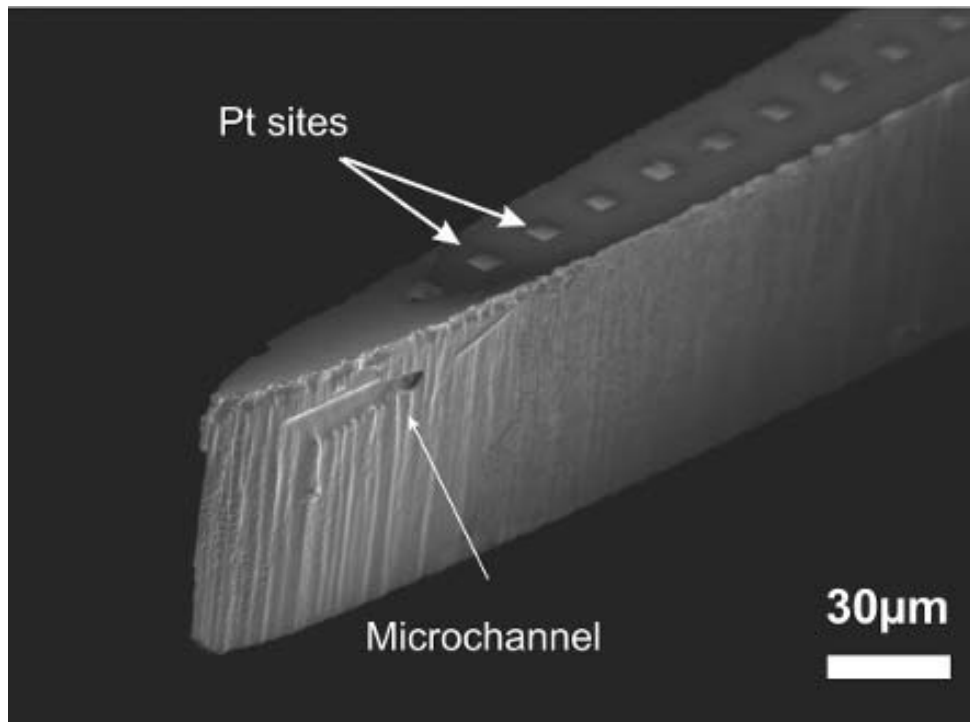
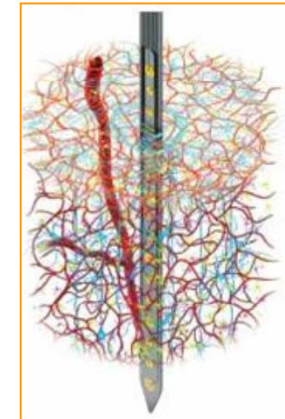


Nagyteljesítményű mikrofon szerkezetek



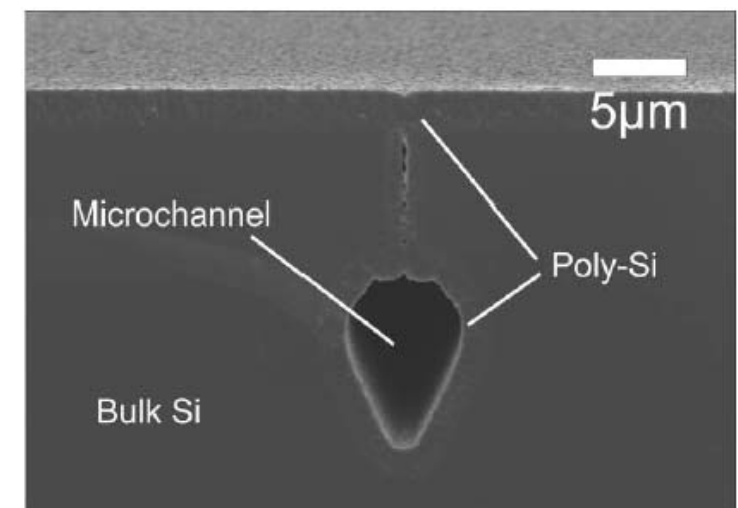
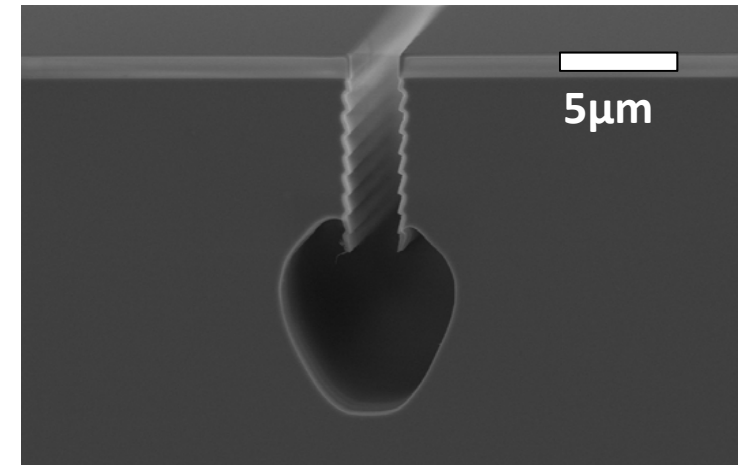
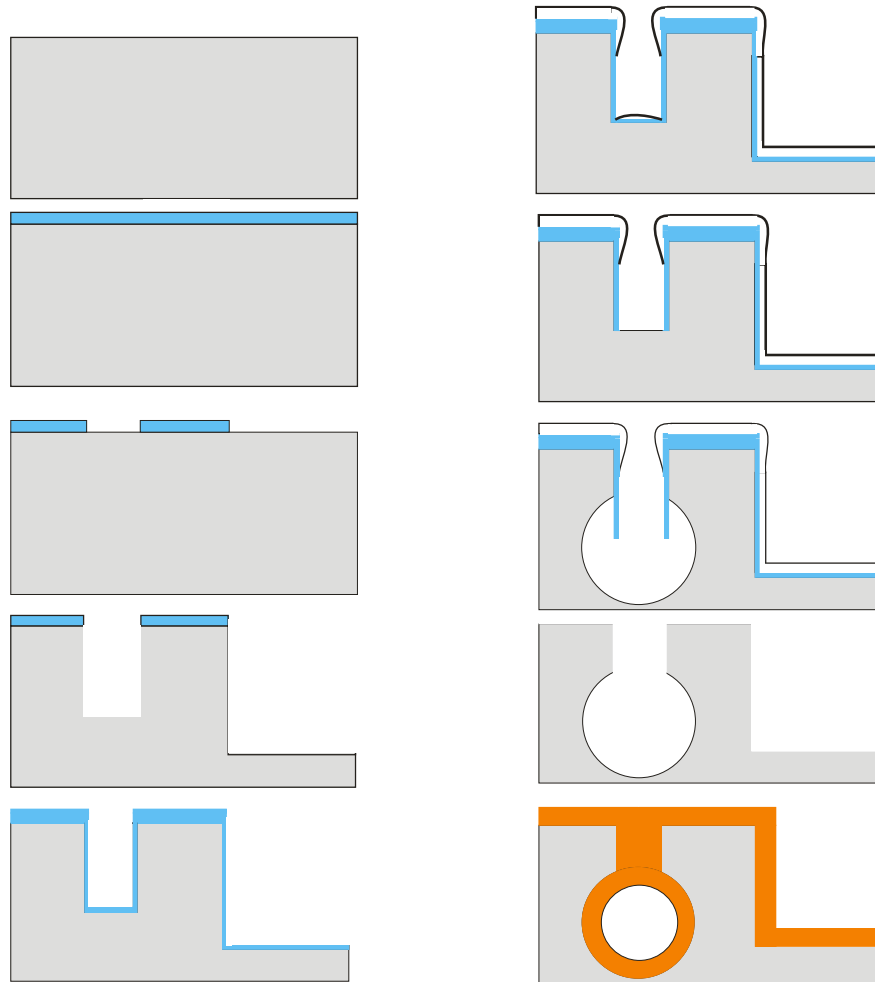
TÖMBI MIKROMECHANIKA: ELTEMETETT CSATORNA

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)