



Mikromechanikai technológiák

Rétegeltávolítás, marások

Fürjes Péter

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

Mit tudtok a témáról?

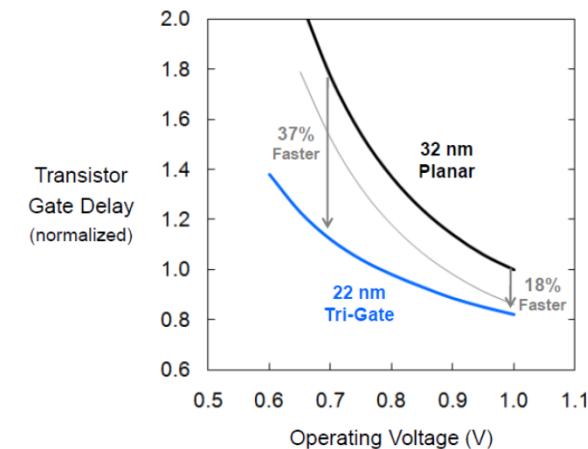
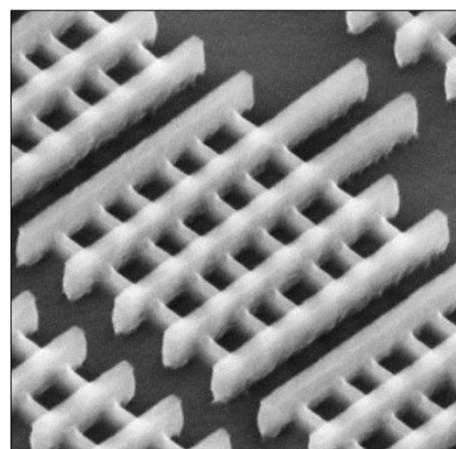
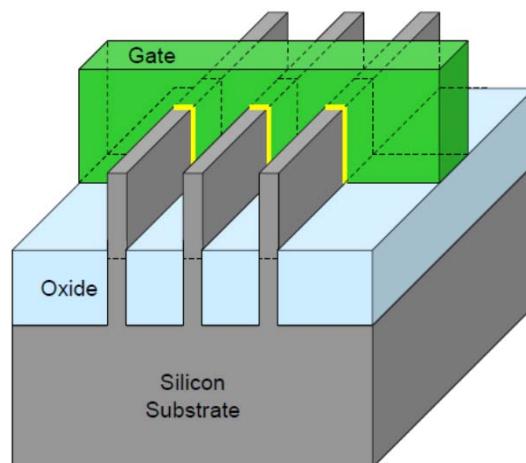
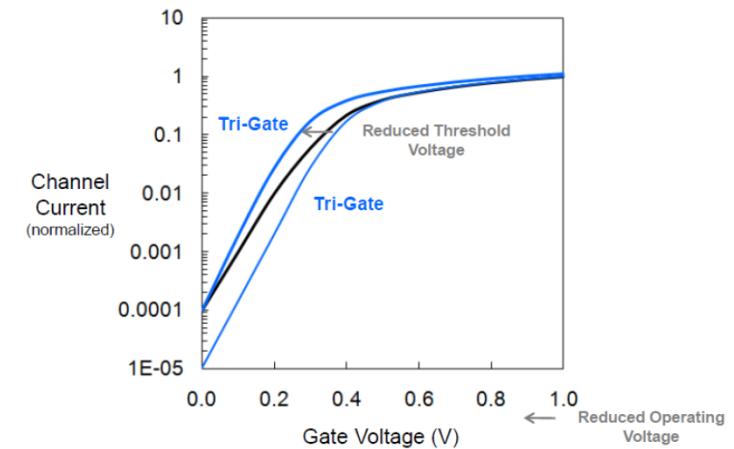
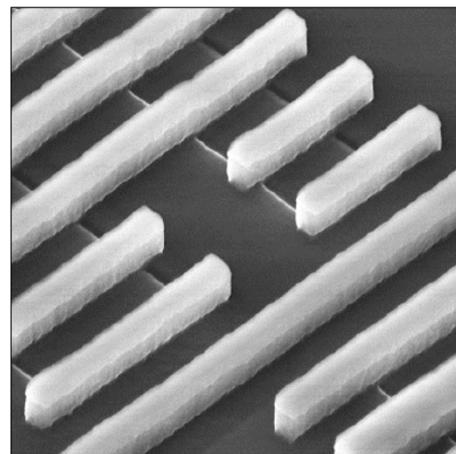
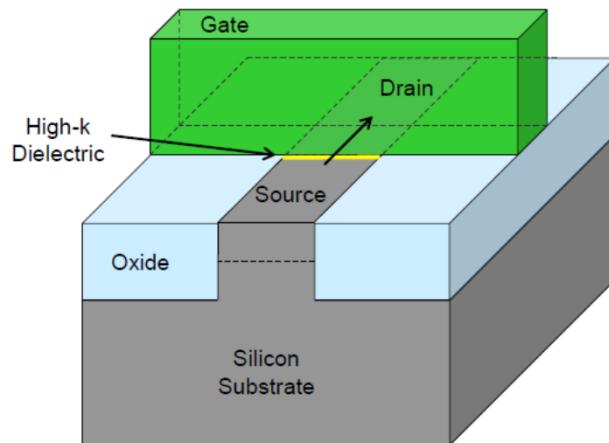
Mit jelent?

- 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)





MEMS • BIOMEMS • NEMS

MIKROMECHANIKA

MEMS Lab • Institute of Technical Physics and Material Sciences • Centre for Energy Research • Hungarian Academy of Sciences



MEMS Lab • Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet • Energiatudományi Kutatóközpont • Magyar Tudományos Akadémia

MEMS.HU

BIOMEMS.HU

Mikromechanika

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

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

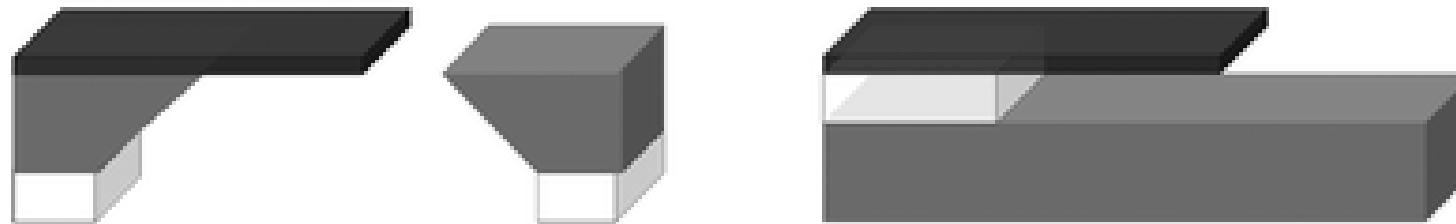
Mikromegmunkálás:

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

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

Tömbi vs. felületi mikromechanika



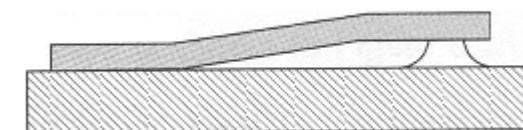
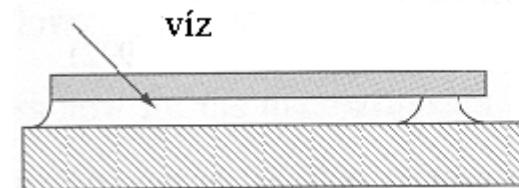
Device Layer
Silicon Wafer
Silicon Oxide



(a)

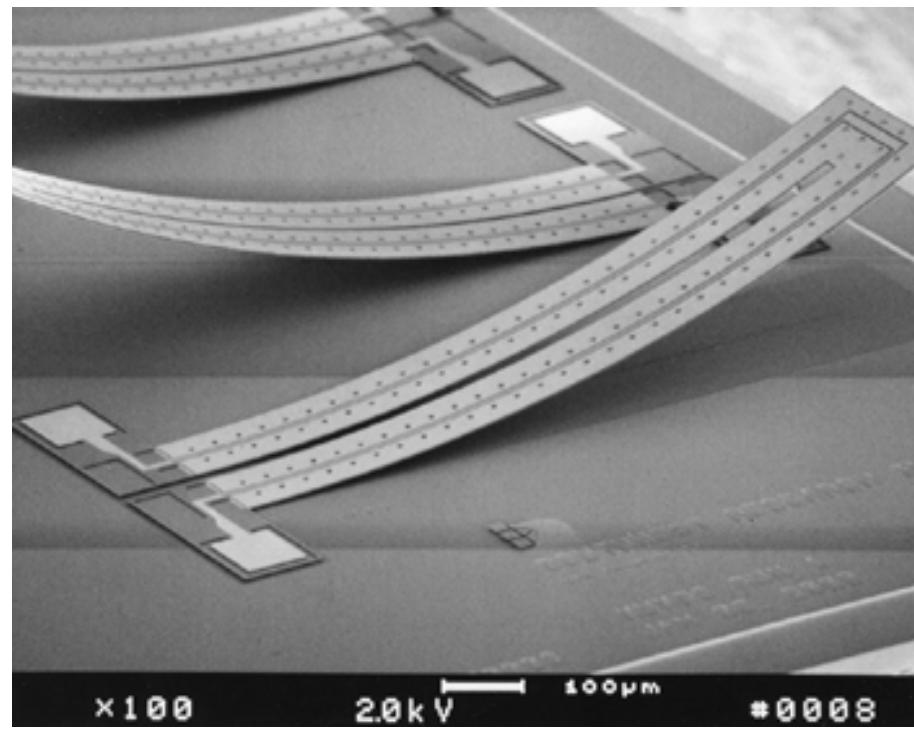
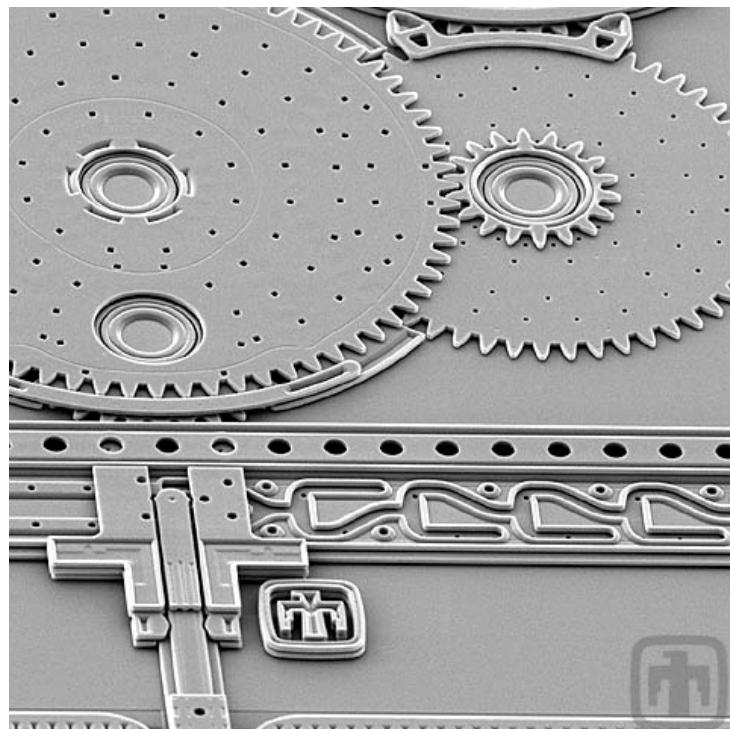
(b)

Jellegzetes hiba: letapadás

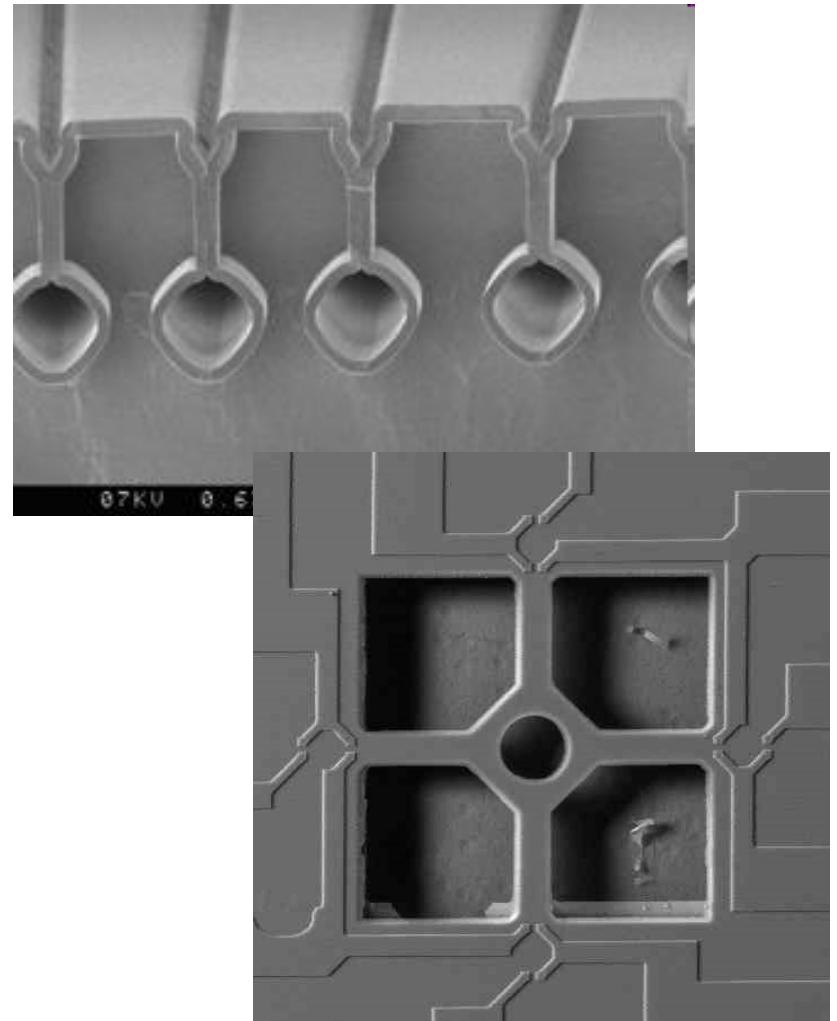
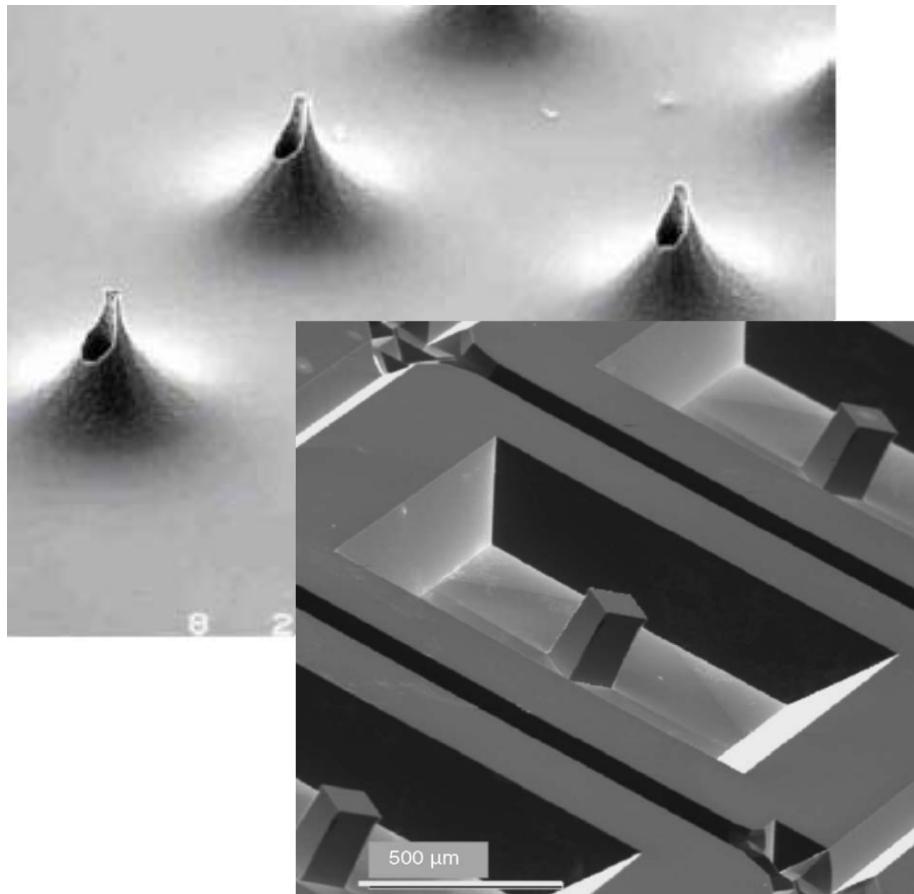


Megoldás:
beépített ütköző
vagy perforált alakzatok
vagy száraz marások

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, a mi a szilárd anyag kioldásával jár

Száraz marás:

- gáz vagy gőzfázisú reagens **magas hőmérsékleten**
- gávfázisú 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 kevéssé **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 (poliy-gate)

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

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

Nedves kémiai marások – 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

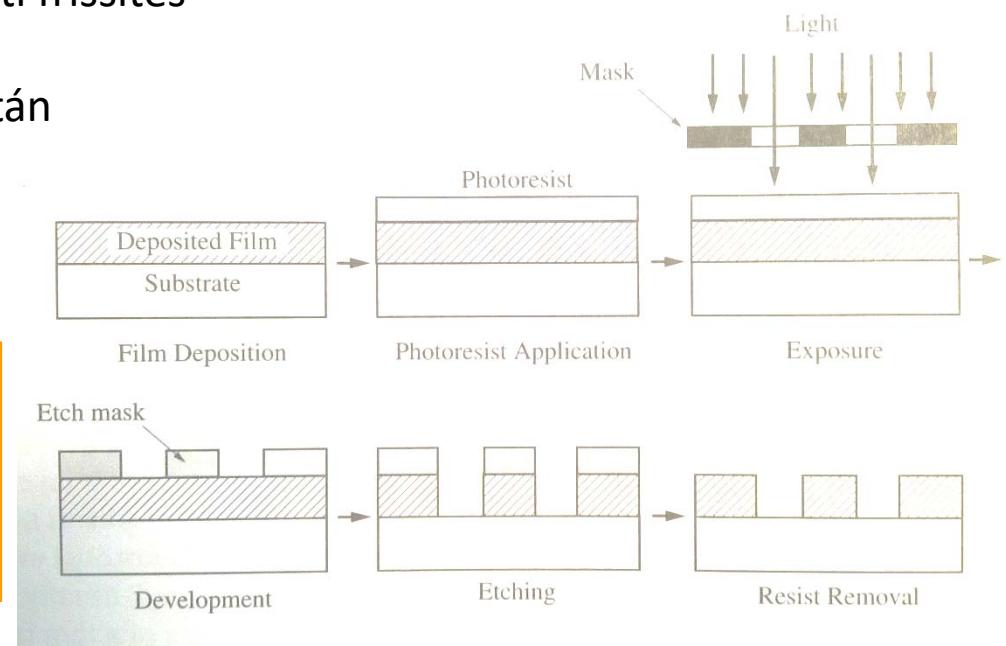
Mintázat leképezése

Előny:

- effektivitás
- megbízhatóság
- egyszerűség
- szelektivitás
- gazdaságosság

Hátrány:

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



Nedes kémiai marások – technológia



MEMS Lab • Institute of Technical Physics and Material Sciences • Centre for Energy Research • Hungarian Academy of Sciences
MEMS Lab • Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet • Energiatudományi Kutatóközpont • Magyar Tudományos Akadémia

Kémiai marások

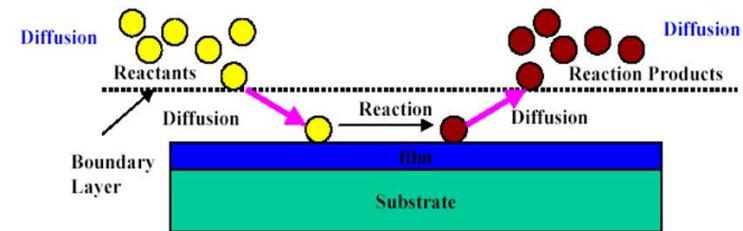
A marási eljárásokkal szemben támasztott követelmények:

- **egyenletes marási sebesség** a teljes hordozó felületén
- **nagy szelektivitás a maszkoló rétre**
(általában fotolakk, de más is lehet)
- **nagy szelektivitás a hordozó rétre**
($v_{réteg}/v_{hordozó} > 10..100$)
- a marandó vékonyrétegek **tipikus méretének megfelelő marási sebesség** ($\approx 0,1\text{--}1 \mu\text{m}/\text{perc}$)
- 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 / mozgatás sebessége

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

- Szennyező típus és koncentráció
- Kritállytani orientáció
- Hőmérséklet

Nedves marások kémiája

Marási sebességet befolyásoló faktorok

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

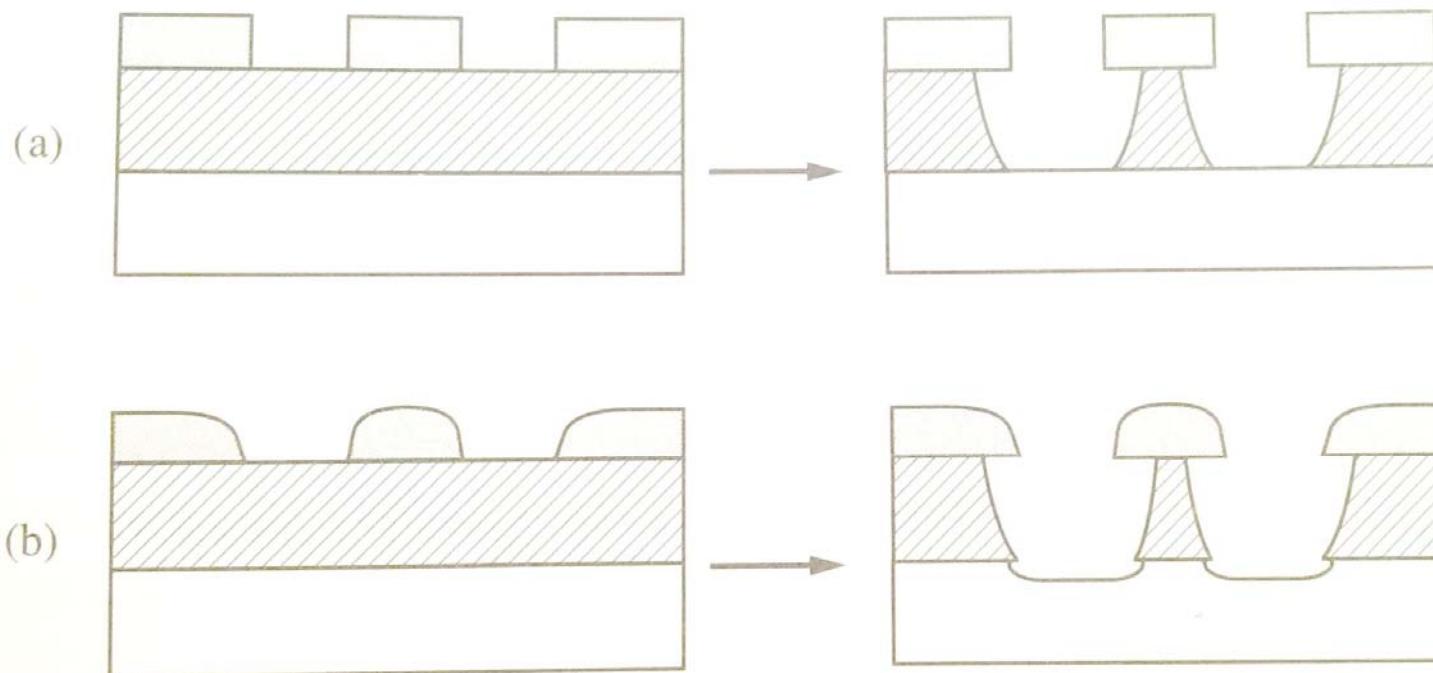
Kémiai marószerek tisztasága:

- Analitikai minőség: ppm szennyezőkoncentráció
- Elektronikai minőség: ppb szennyezőkoncentráció
- MOS minőség: alacsony Na koncentráció
- Ultra VLSI minőség (nagyon drága)
- DI víz: ppm 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, NH ₄ NO ₃ , H ₂ O	Si
SiO ₂	H ₃ PO ₄ , NH ₄ NO 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

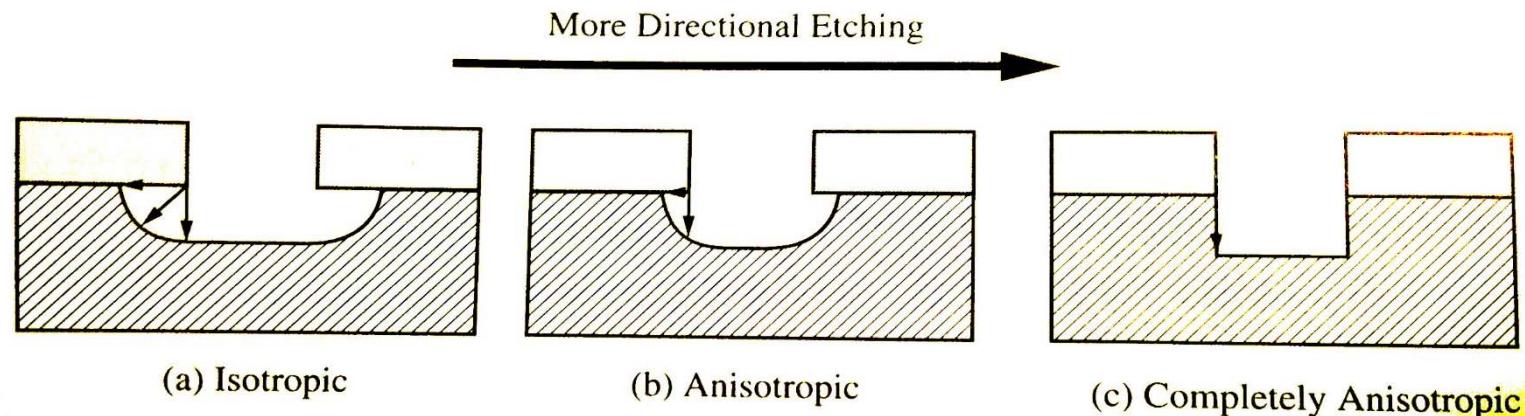
Nedves marások sebesének irányfüggése

Izotróp marás: a reakciósebesség irányfüggetlen

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

Anizotróp marás: a reakciósebesség irányfüggő

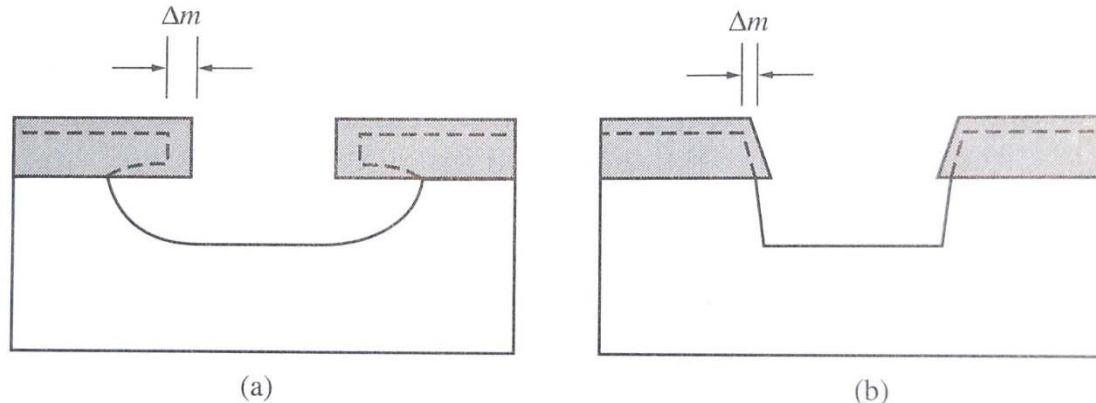
- Kristályos anyagok marása lehet izotróp és anizotróp a marószer összetételétől és a reakciókinetikától függően
 - Jellemzően reakciólimitált folyamatok



Nedves marások sebesének irányfüggése

Anizotrópia = Marás mélysége
Oldalirányú alámarás

Izotróp $\rightarrow x = y$
Anizotróp $\rightarrow x << y$



- 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

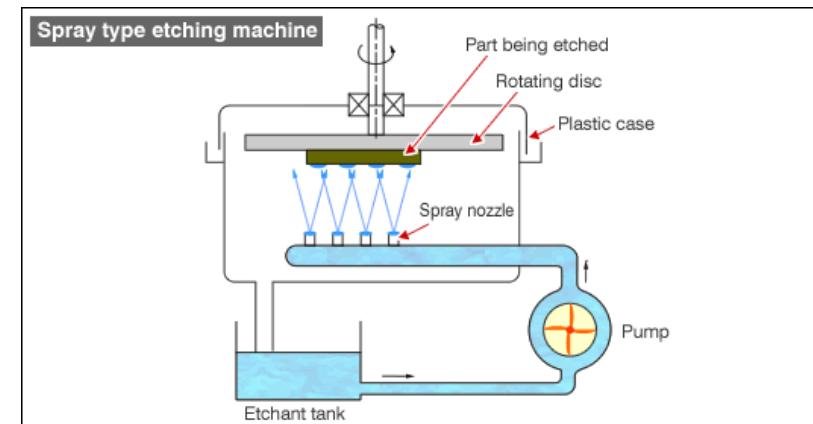
- Hatékony sebességkontrol (paraméterek: porlasztási cseppméret és nyomás)
- Megnövelt marási sebesség a folyamatosan friss marószer miatt
- Kevés szelet

Kemo-mechanikai marás

- Szeletpolírozás (Si szelet vagy polimerek)

Elektrokémiai marás

- Szelektivitás és sebességkontrol
(paraméterek: potenciál vagy áram)

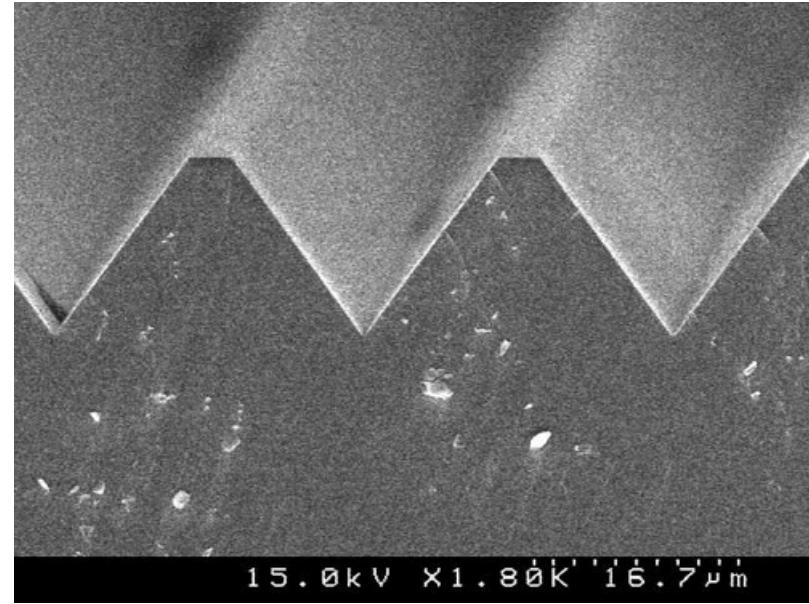
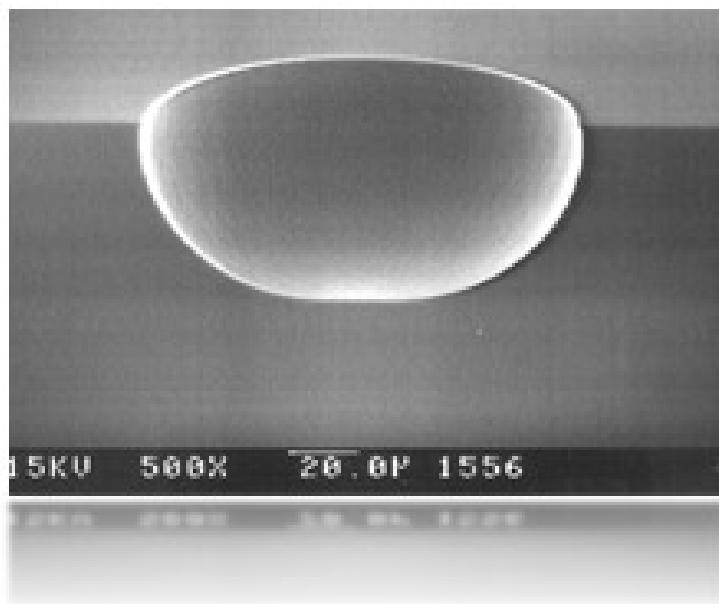


Nedves marási rendszerek

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”	Selective over Si (i.e., will etch Si very slowly in comparison). Etch rate depends on film density, doping.
	NH ₄ F:HF (6:1) “Buffered HF” or “BOE”	About $\frac{1}{20}$ 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%)	Etch rate depends strongly on film density, O, H in film.
	H ₃ PO ₄ :H ₂ O (boiling @ 130–150°C)	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)	Etch rate depends on etchant composition.
	KOH:H ₂ O:IPA (23 wt. % KOH, 13 wt. % IPA)	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)	For wafers without metal.
	Organic strippers	For wafers with metal.

Marási sebesség irányfüggése



Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség

(pl. poli-maró - HF-HNO₃-CH₃COOOH)

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

(pl. lúgos maró – KOH)

Si izotróp marása

HF/HNO₃ rendszer marási mechanizmusa

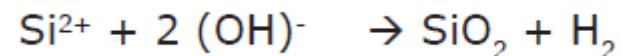
(1) NO₂ képződés



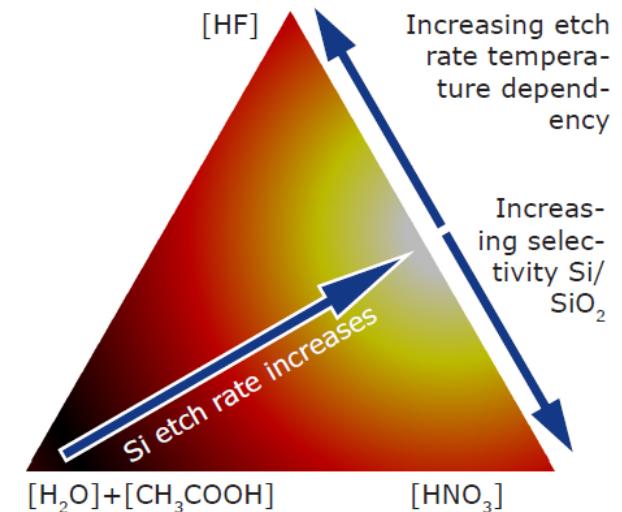
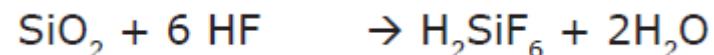
(2) Si oxidációja NO₂ által



(3) SiO₂ képződés



(4) SiO₂ marása



Si anizotróp lúgos marása

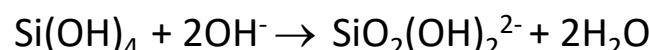
- OXIDÁCIÓ



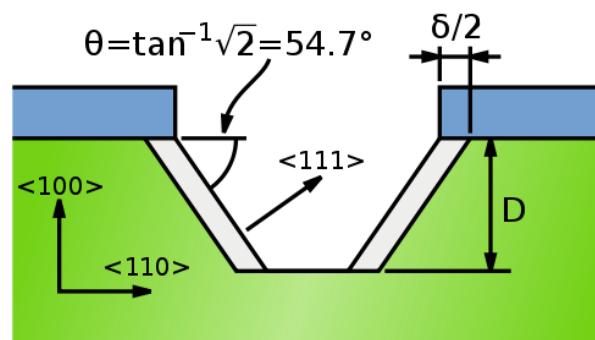
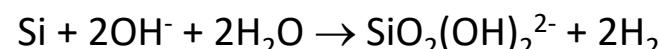
- REDUKCIÓ



- OLDÓDÁS



Bruttó reakció



A marási sebesség függ:

1) Koncentrációtól

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

2) Hőmérséklettől

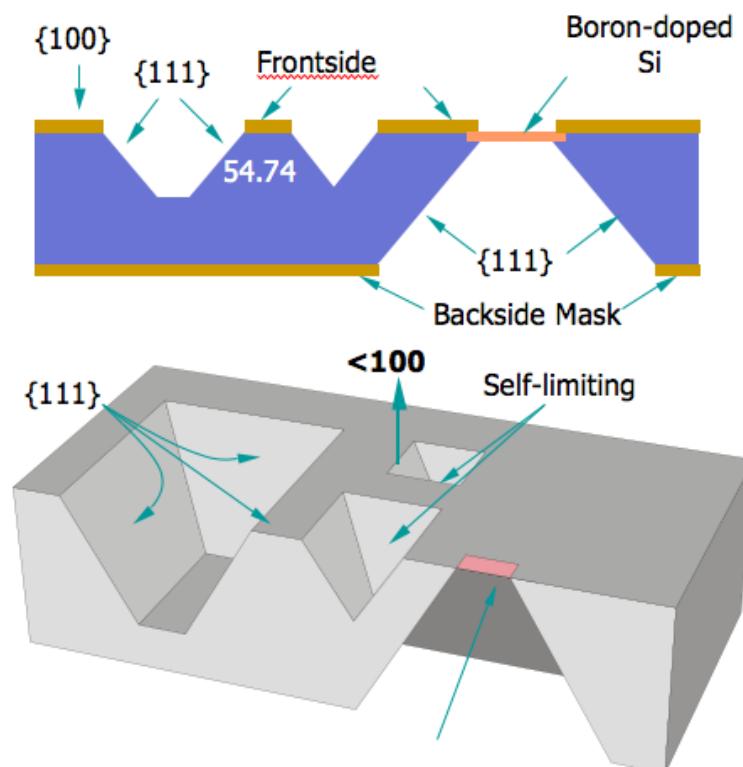
$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

3) Reakciótermékek diffúziójától

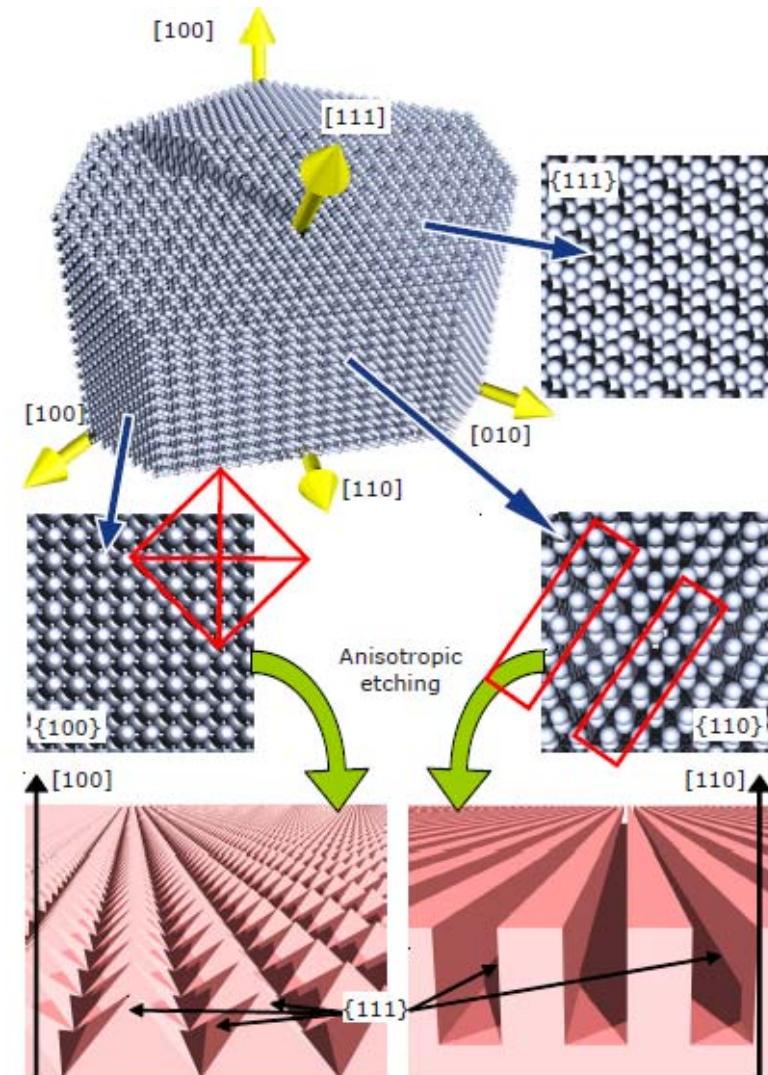
Nagy szelektivitás a hordozóra:

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

Marási anizotrópia KOH marászerben



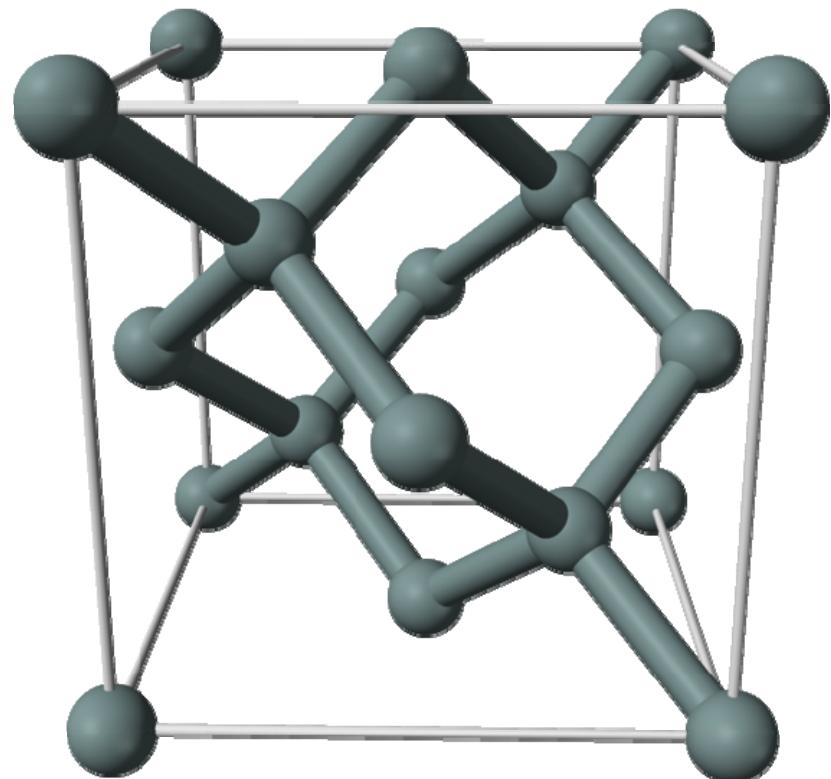
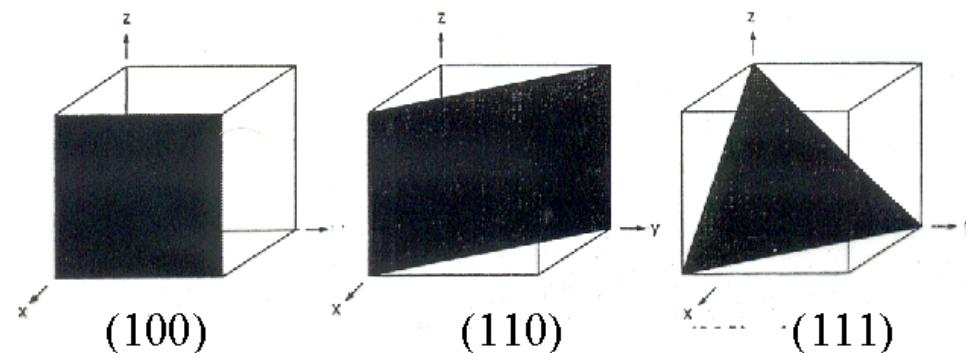
Szelettípus és orientáció is számít!



Marási sebesség irányfüggése

Szilícium rácsszerkezete: gyémánträcs

Legegyesűbb kristálytani síkok:



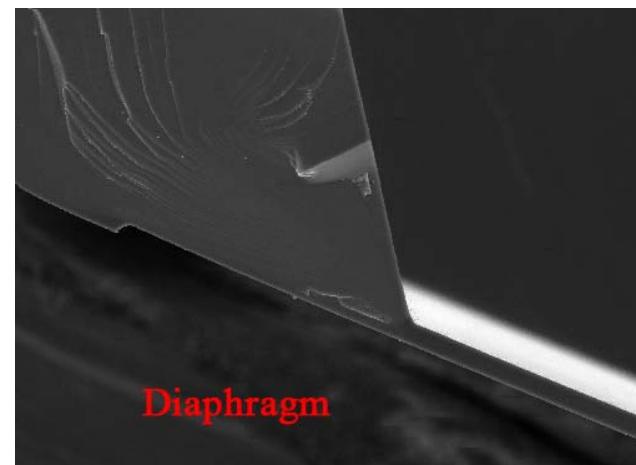
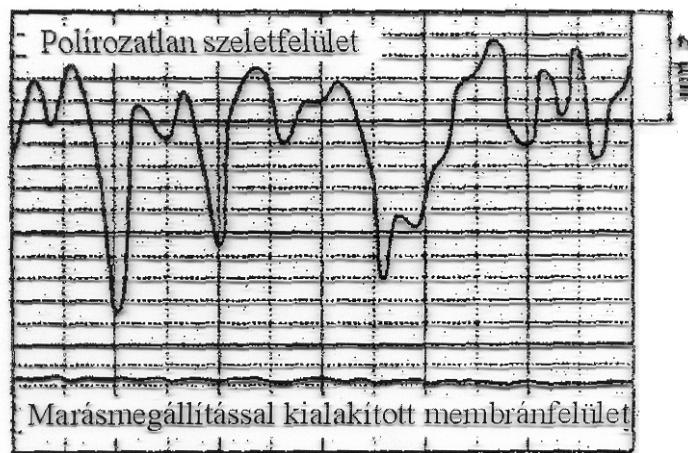
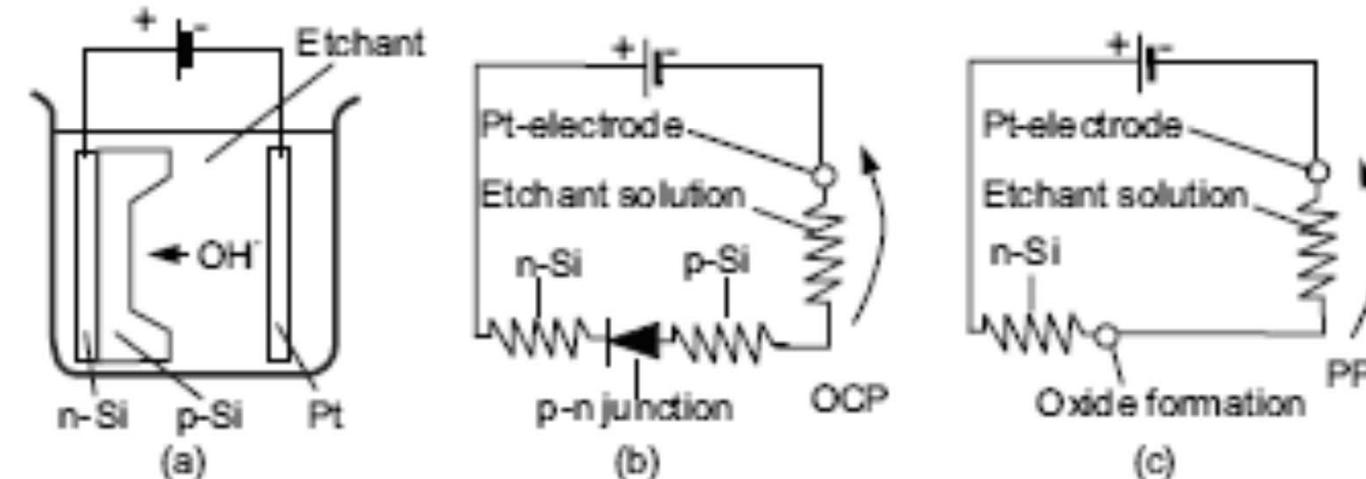
Si-Si kötési energia:

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

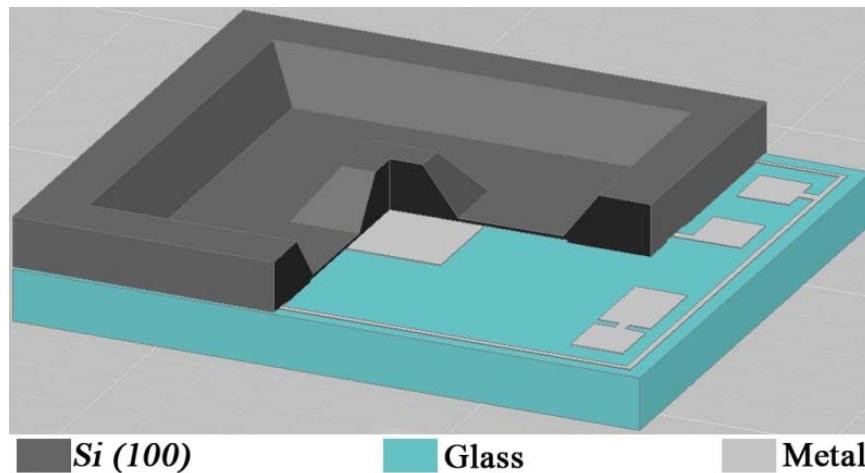
Marási sebesség:

$$v_{<111>} \ll v_{<100>} < v_{<331>}$$

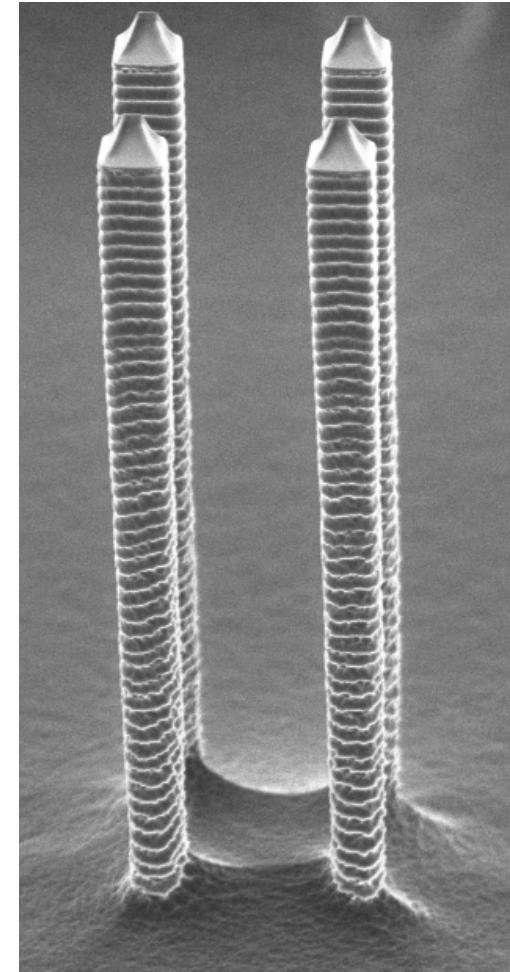
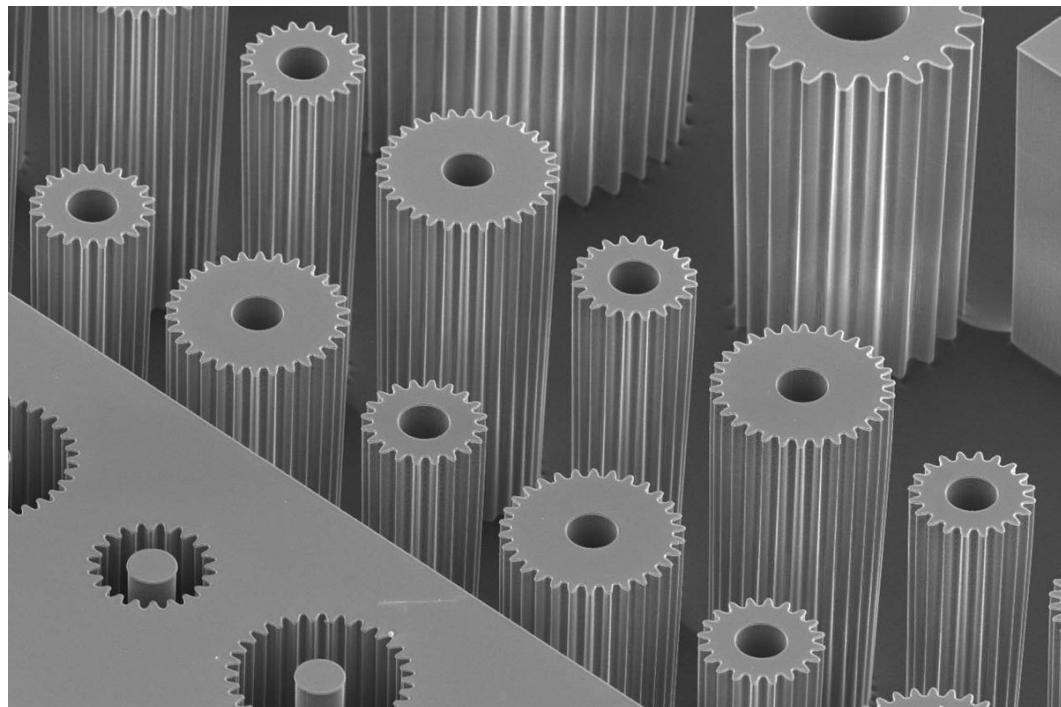
Elektrokémiai marásmegállítás - ECES



Nyomásmérő szenzor



Szárazmarások



Marások szerepe a mikrotechnológiában

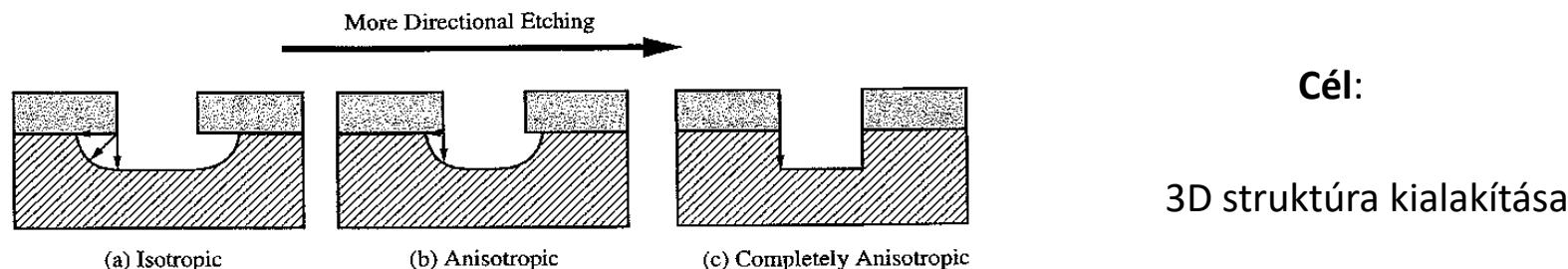
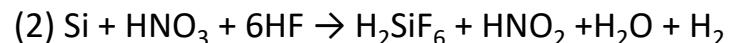
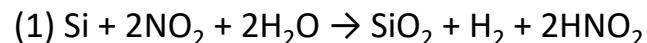


Figure 10-3 Etch profiles for different degrees of anisotropic, or directional, etching: (a) purely isotropic etching; (b) anisotropic etching; (c) completely anisotropic etching.

Nedves marás

- Folyékony marószer
 - Kémiai folyamat

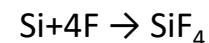
Si nedves kémiai marása: $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ elegyében



Száraz marás

- Gáz fázisú marószerből plazma
 - Kémiai és fizikai folyamat

Si száraz marása: halogén alapú plazmákban



Plazma marások jellemzői

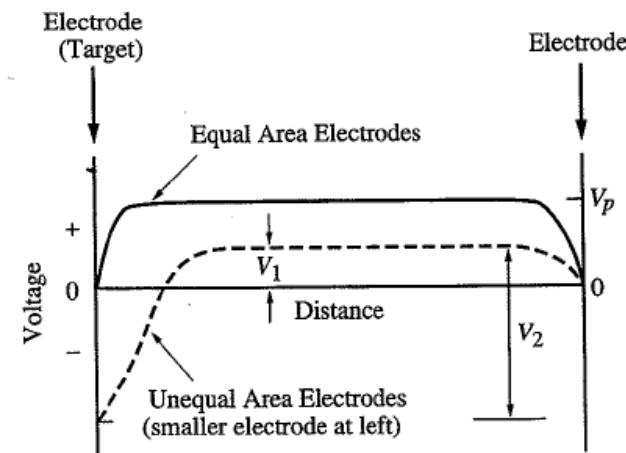
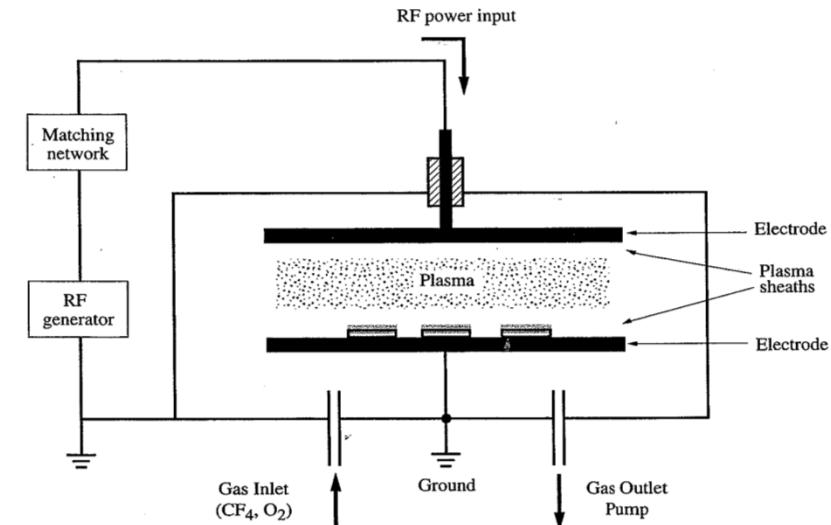
Plasma Glow

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



plasma glow – vezető gáz

(ionok, szabad gyökök, elektronok, semleges részecskék), 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)

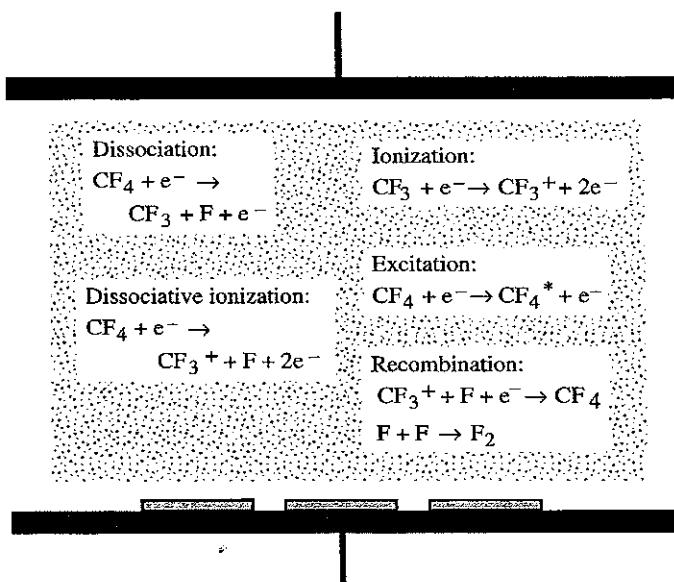


Figure 10–9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

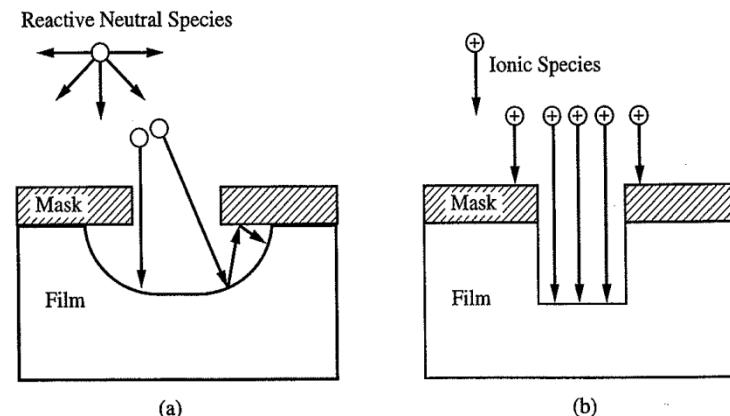
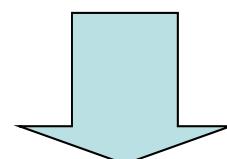
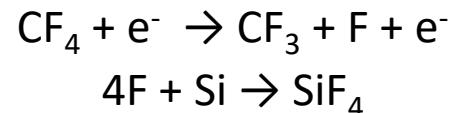


Figure 10–11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient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

Kémiai marás

Szabad gyökök (semleges, nemkötő elektronpárral rendelkezik) – 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. O_2 gáz a disszociált CF_3 , CF_2 -vel reagál, ezzel megakadályozza a rekombinálódást CF_4 -gyé, ezzel növeli a szabad F jelenlétét DE: túl sok O_2 túlságosan felhígítja a maró gázt!

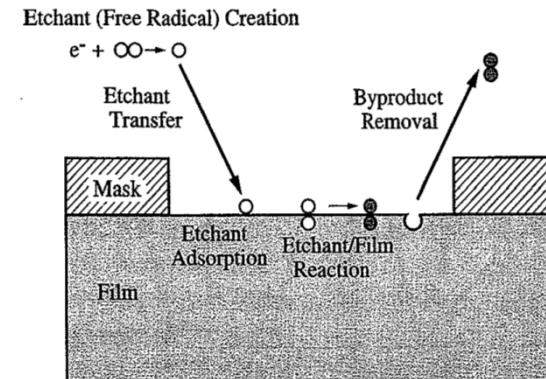


Figure 10-10 Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

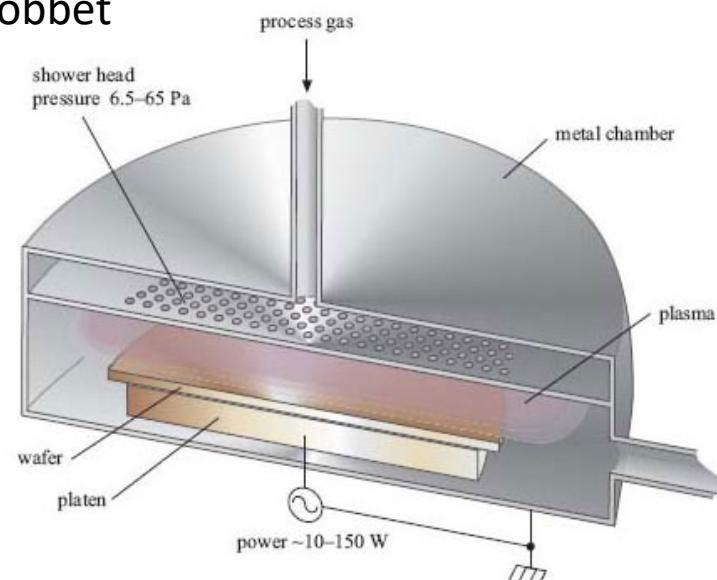
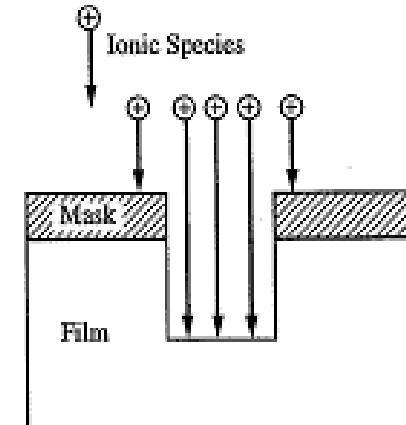
Izotróp a marás, mert

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
- Kémialag segített ionsugaras marás

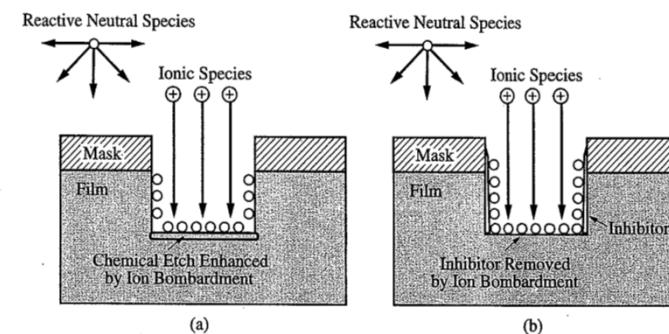
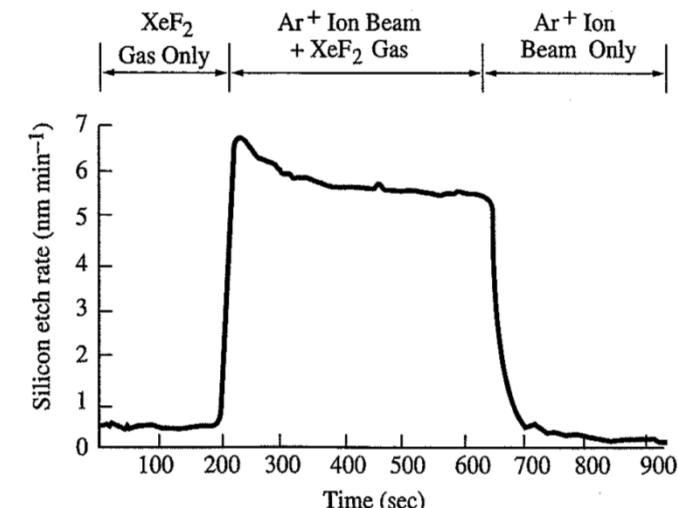


Figure 10-13 Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

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
- Fiziszorbcí a felületeken
- Anyagtranszport folyamatok sebességeinek arányai

Hőmérséklet

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

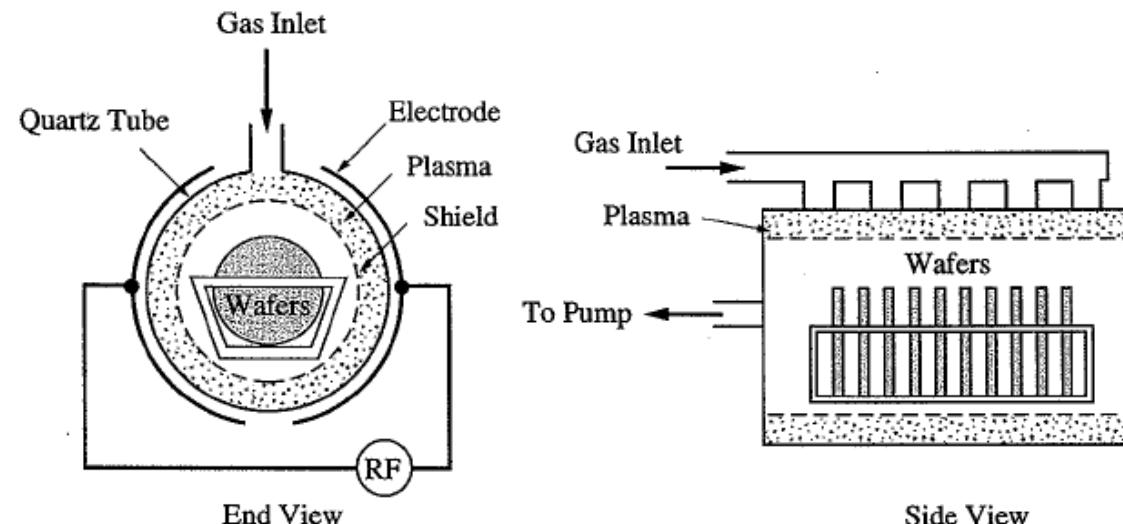
Gázáramlási sebesség / plazma teljesítmény: legyen nagy
Gerjesztése fekvencia: 13.56 MHz

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
- $p=10-1000\text{ mtor}$

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

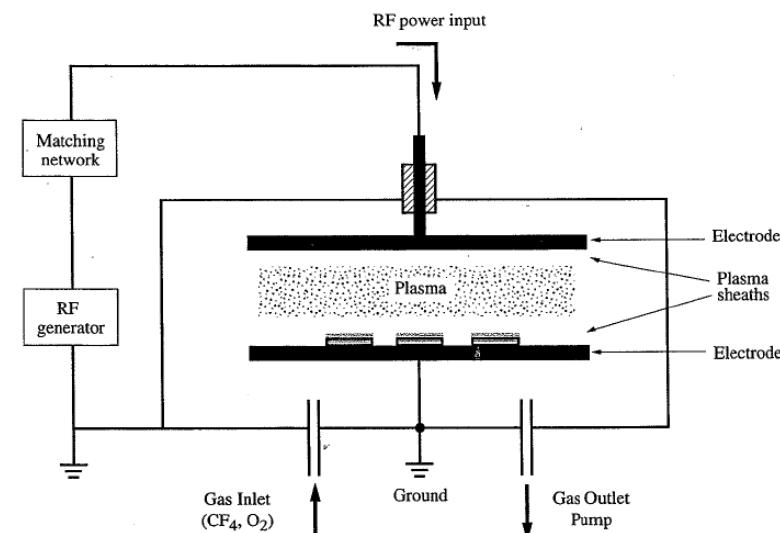


Figure 10-7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

Plazma maró berendezések III.

Sík plazmamaró – RIE (Reactive Ion Etching) mód

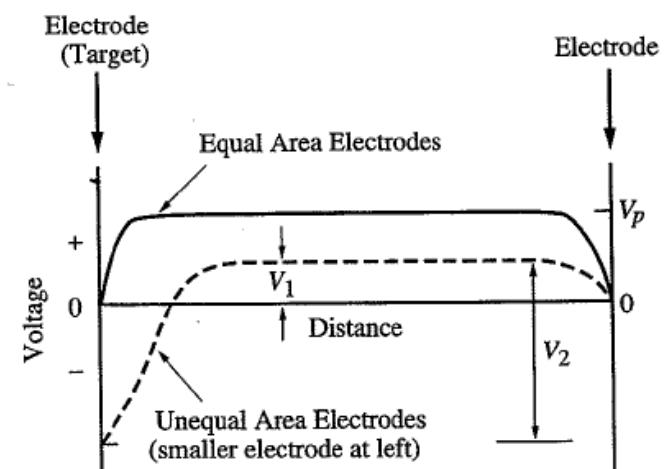
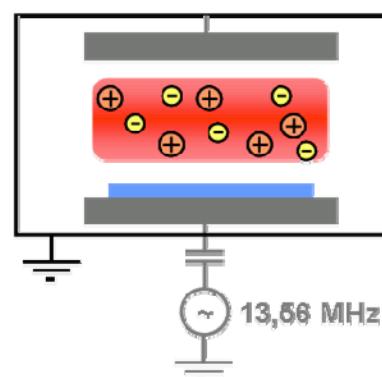
- A szelet a kisebbik elektródán ül, gyakran csak egy szelet
- A nagyobbik a földelt elektróda, csatlakoztatva a kamra falához, jelentősebb a feszültség esés 100-800V tartományban (bias) - ion segített anizotróp marás lehetséges
- kisebb nyomás esetén még irányítottabb a marás, de kisebb a plazma sűrűség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

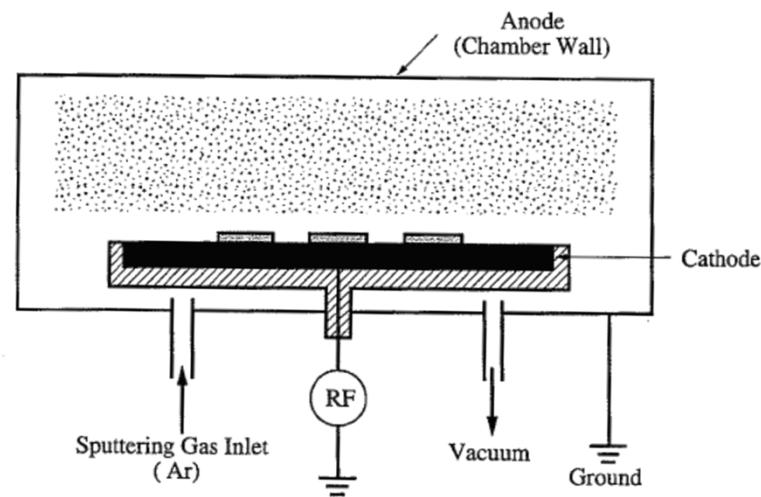
Al: Cl_2 , BCl_3



Plazma maró berendezések IV.

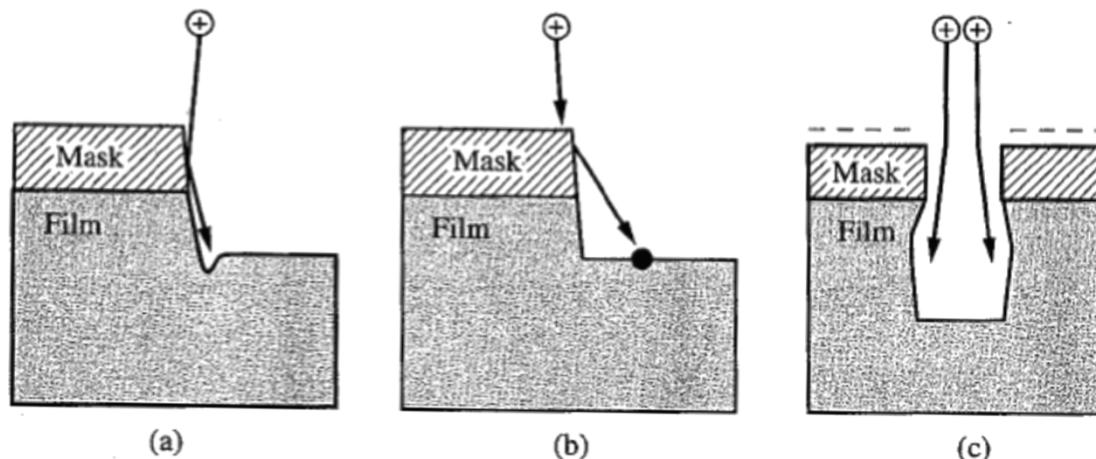
Porlasztás és ion marás (Sputter etching, Ion milling):

- 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 kiporlasztott 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

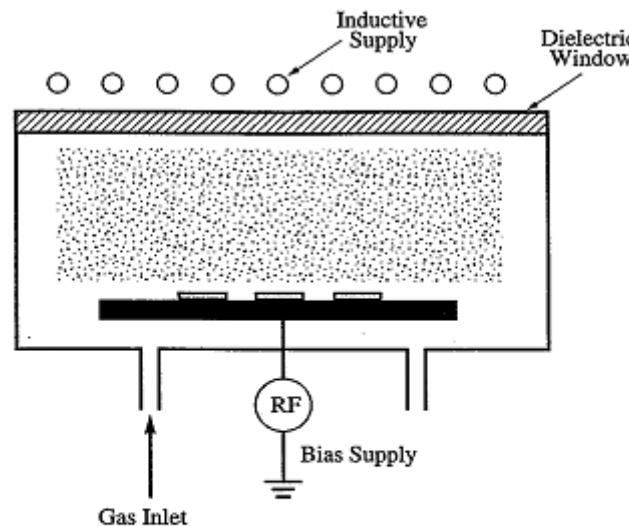


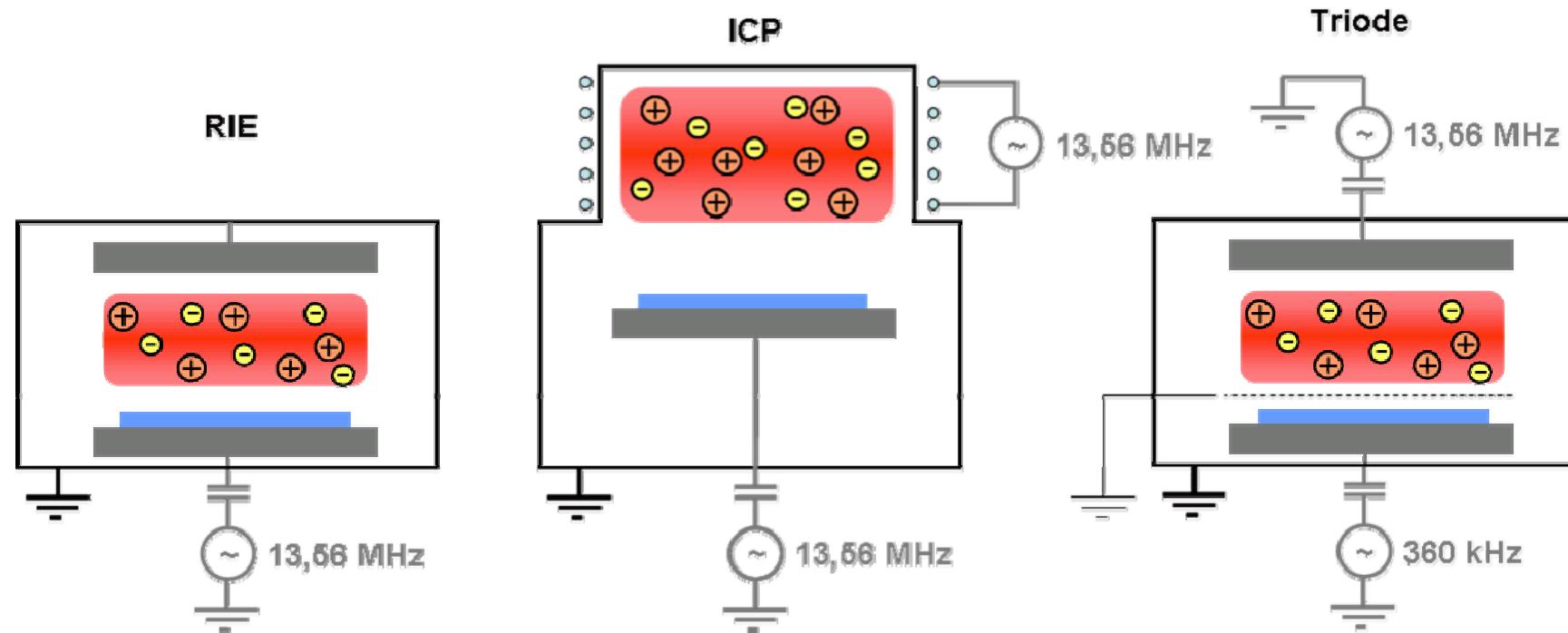
Figure 10-16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **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



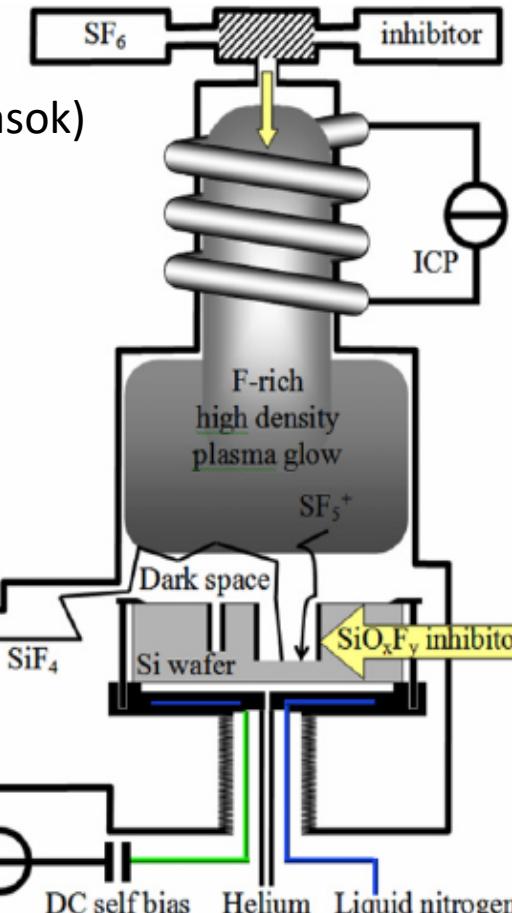
DRIE Intro

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

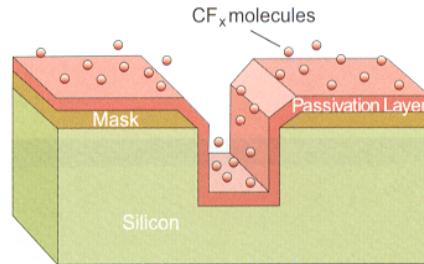
$SF_6 + O_2$ @ cryo °C

Pulsed mode DRIE / Bosch

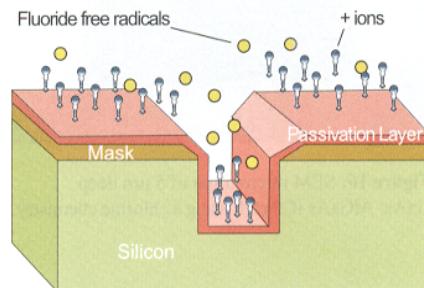
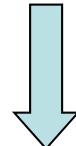
$SF_6 + C_4F_8$ @ RT

Figure 1. A dual source DRIE system.

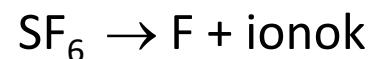
DRIE – Bosch Process



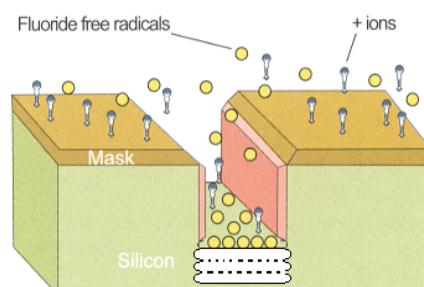
- Passziválás



- Marás



ionbombázás + polimer
marás (függőleges falak
kivételével)



- SF_6 izotróp - enyhén
anizotróp Si marás



DRIE Cryo vs Bosch

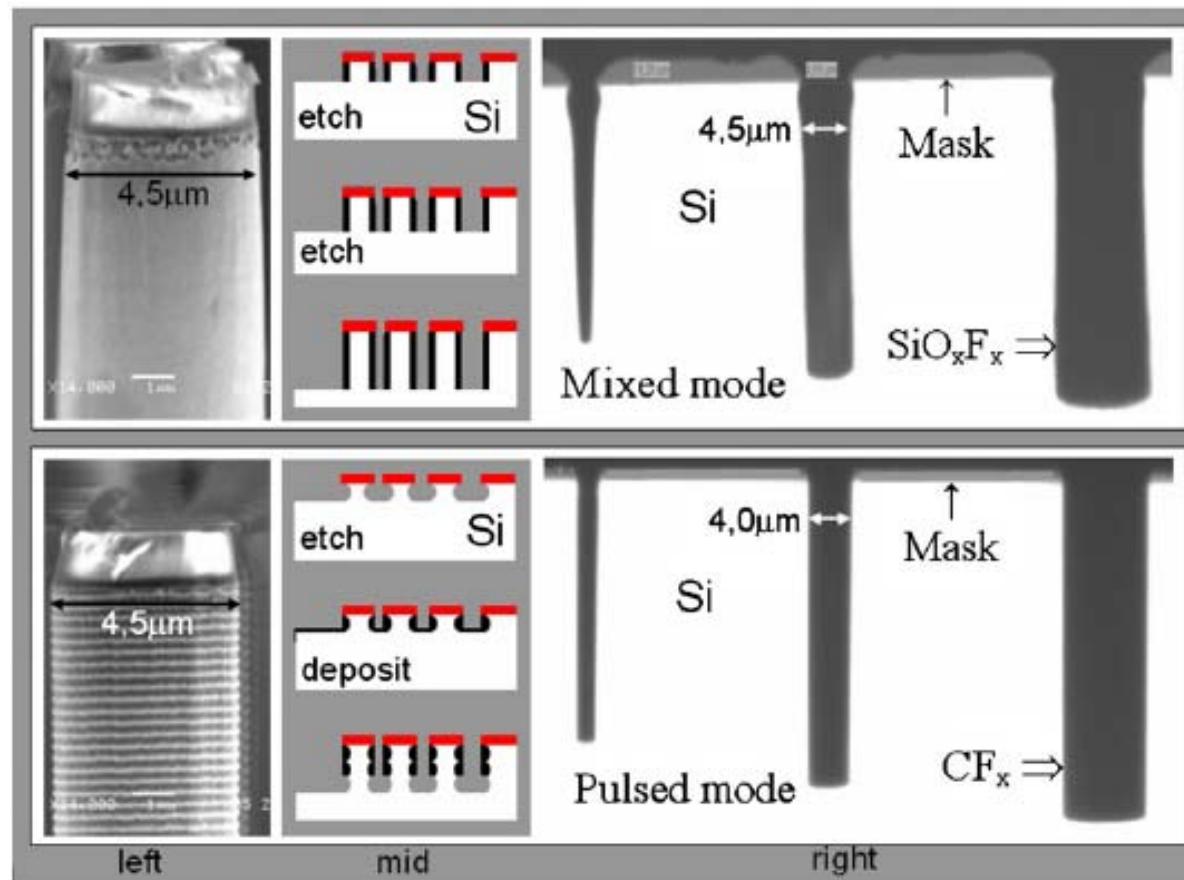


Figure 3. Cross-sectional views of trenches etched in mixed-mode versus pulsed-mode DRIE.

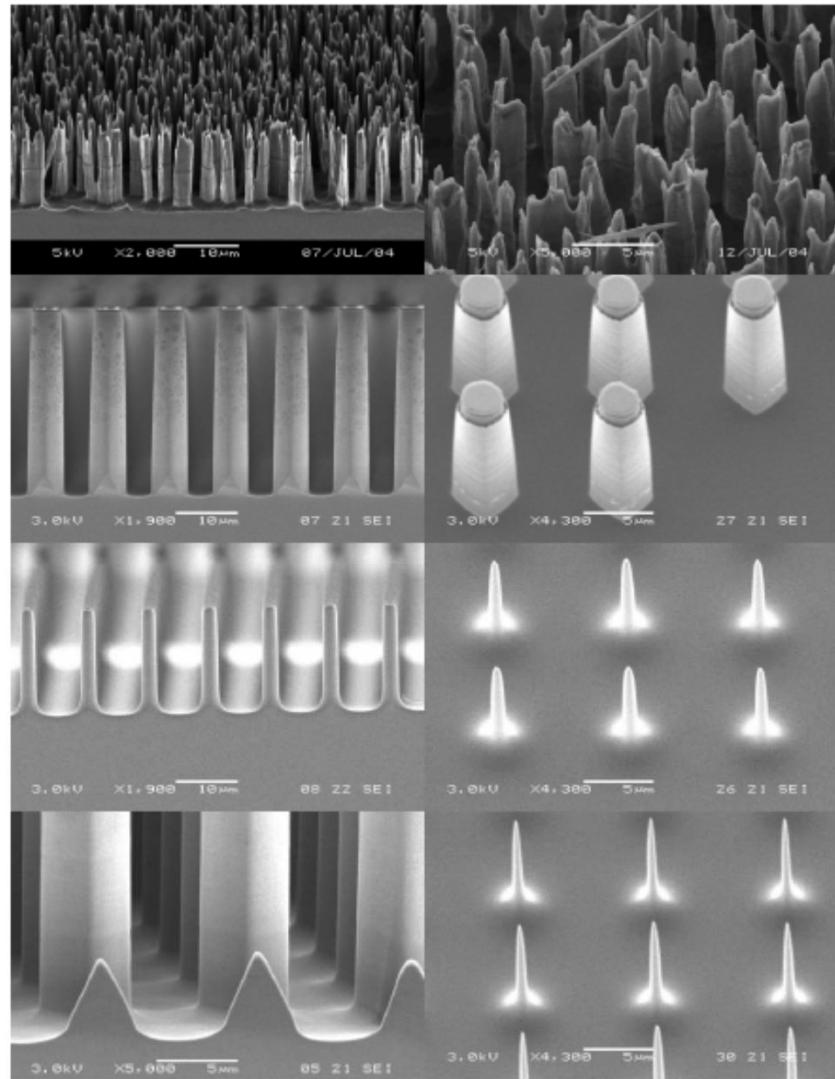


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

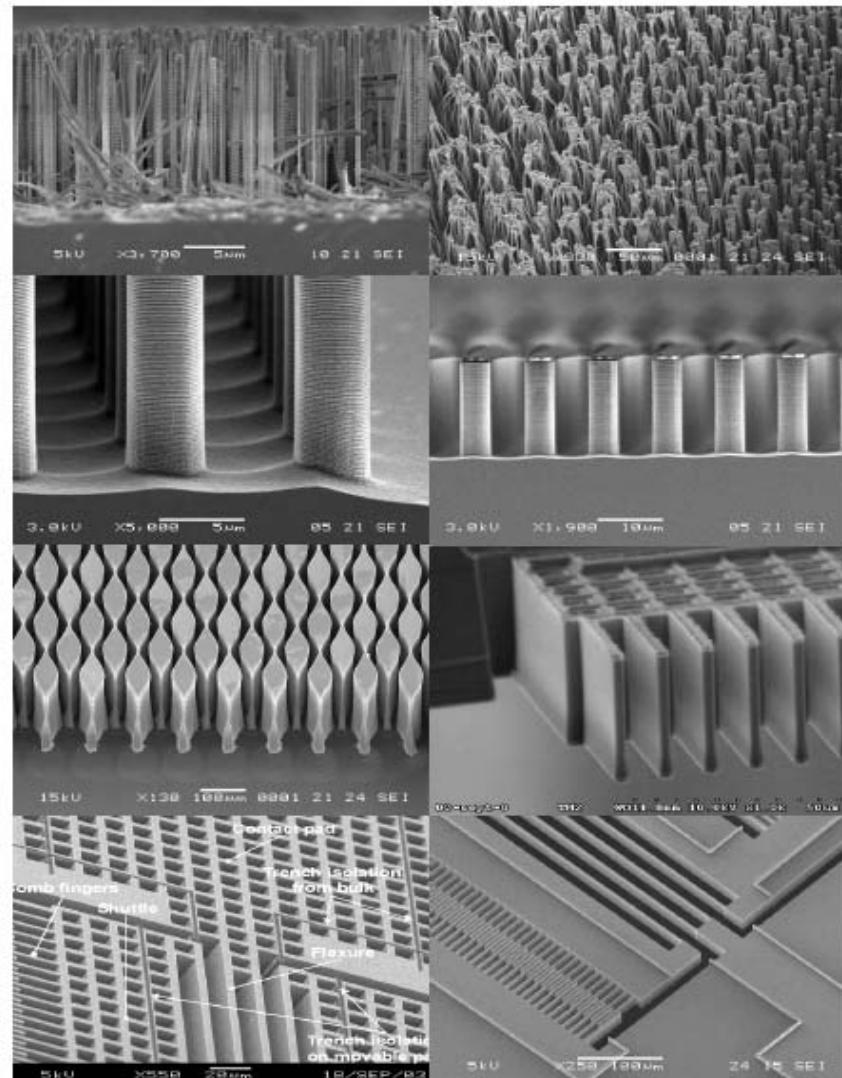
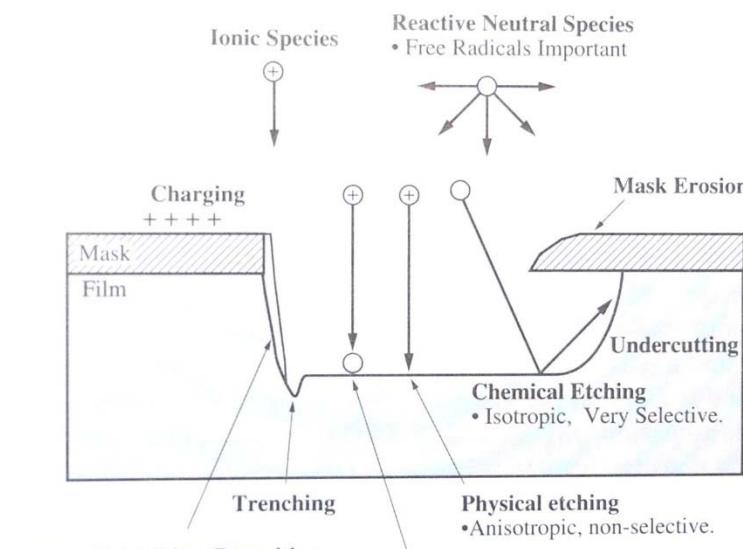


Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).

Plazma marás - összegzés



Sidewall-inhibitor Deposition

- Sources: etch byproducts, mask erosion, inlet gases.
- Removed on horizontal surfaces by ion bombardment.
- A possible mechanism in ion enhanced etching.

Ion Enhanced Etching

- Needs both ions and reactive neutrals.
- May be due to enhanced etch reaction or removal of etch byproduct or inhibitor.
- Anisotropic, selective.

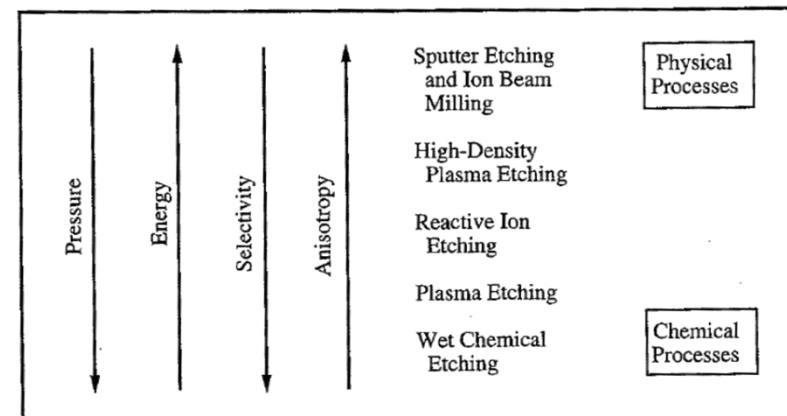


Figure 10-19 Summary of trends of different etch systems.

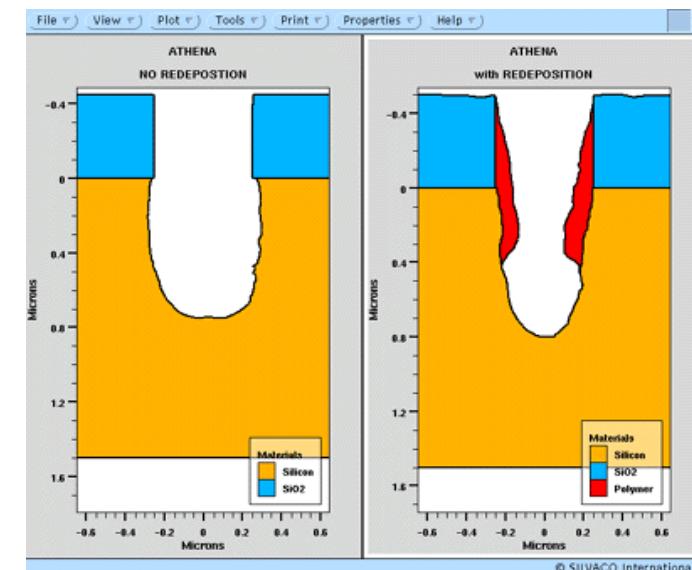
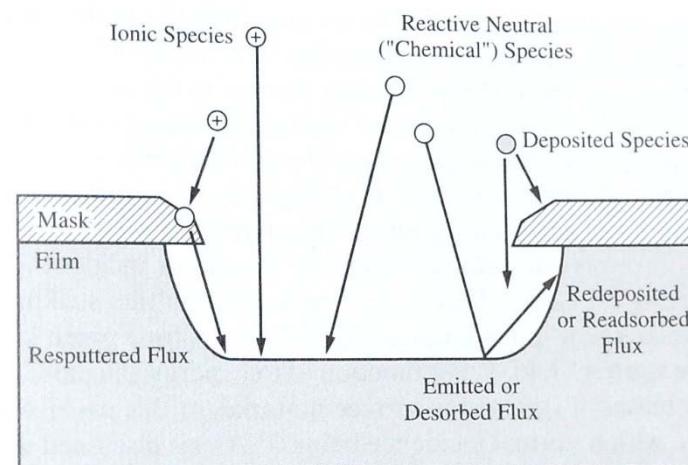
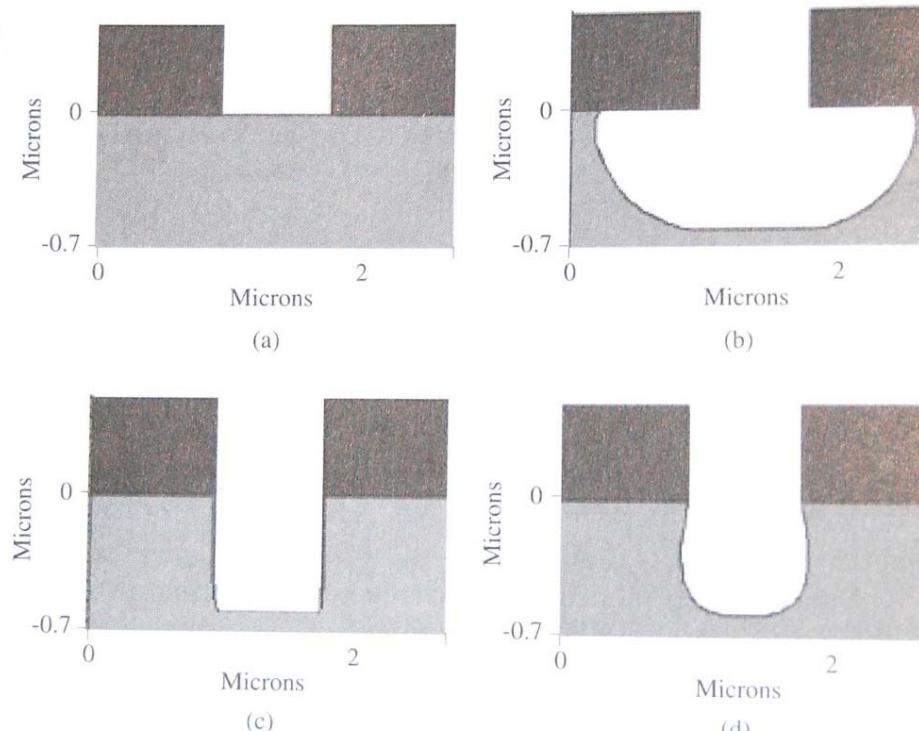
Plazma marás - összegzés

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



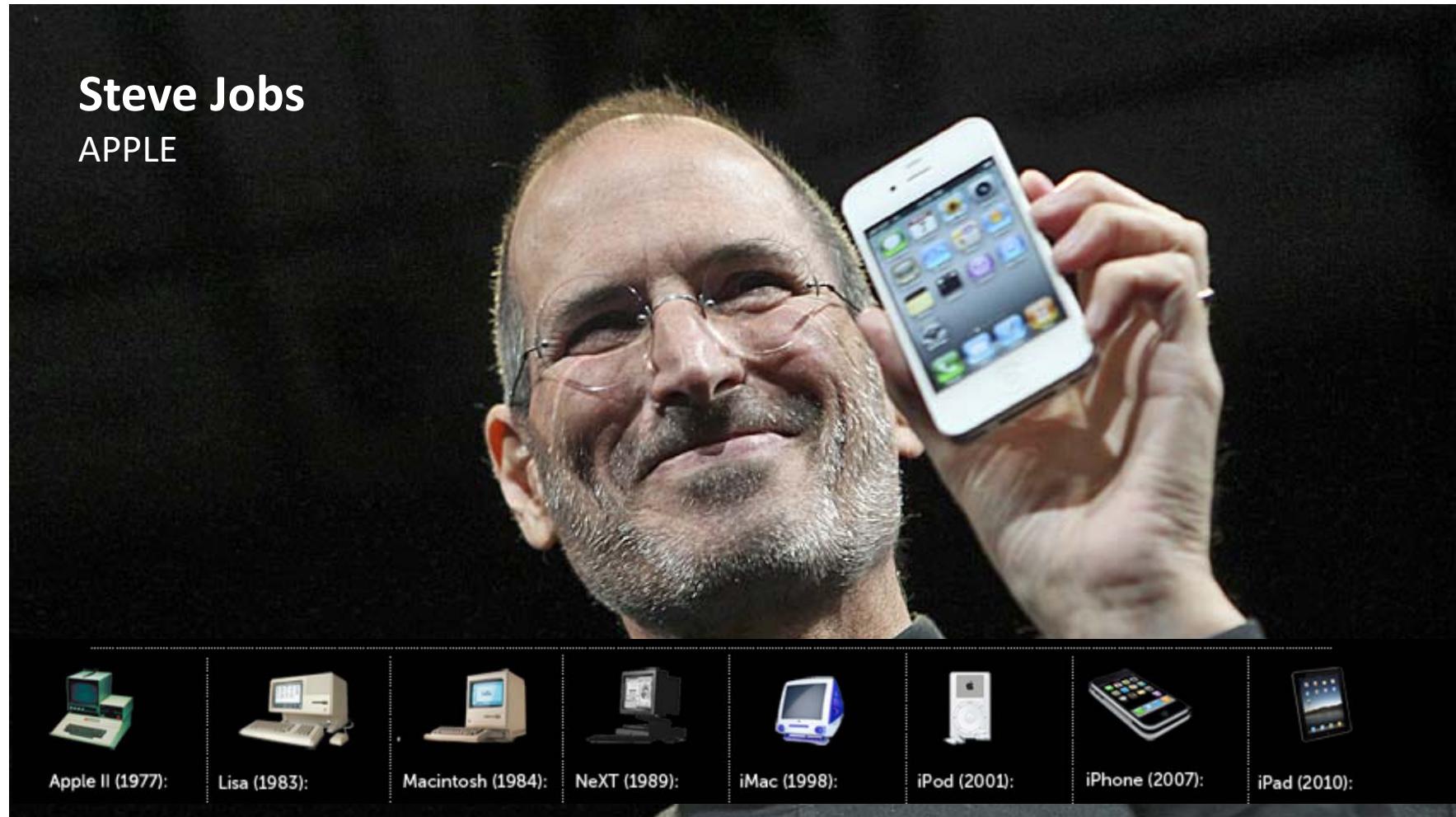
Ellenőrző kérdések

- 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 aniizotróp marásának mechanizmusát lúgos (KOH) marószer esetén!
- 6. Hogyan függ a lúgos marás mechanizmusa a szubsztrát adalékoltságától?
- 7. Mi az elektrokémiai marásmegállítás (ECES)?
- 8. Mire alkalmazható a pörusos 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 hatásfoka egy közönséges sík plazmamaróétől?
- 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?



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 (diszkrét)
- Proximity / RGB
- Környezeti világítás

2014 IPHONE 6

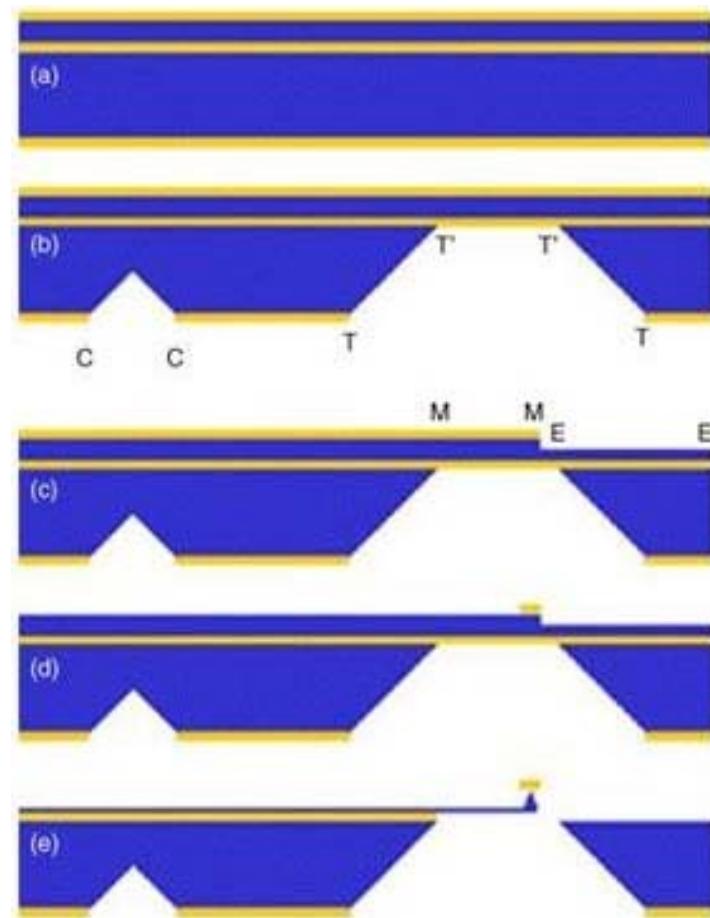
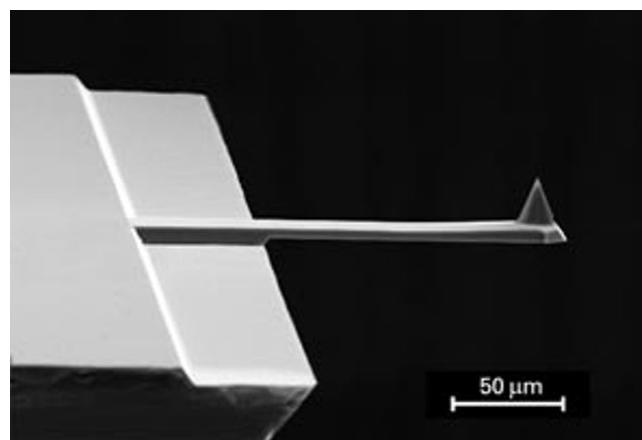
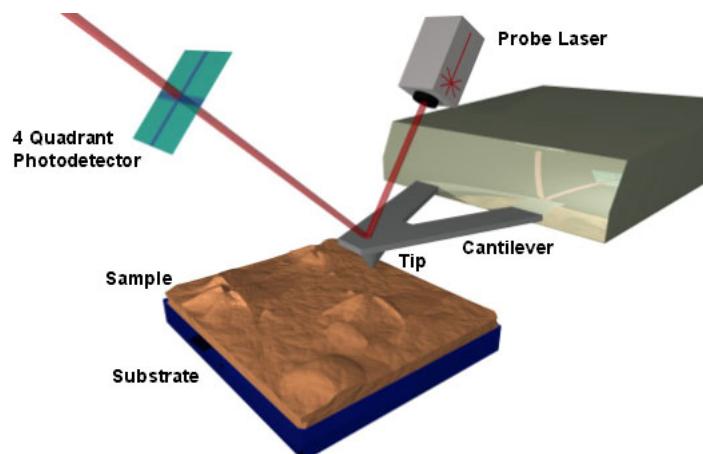
Szenzor Hub:

- Nyomás
- 6 tengelyű gyorsulásmérő
- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS Mikrofon

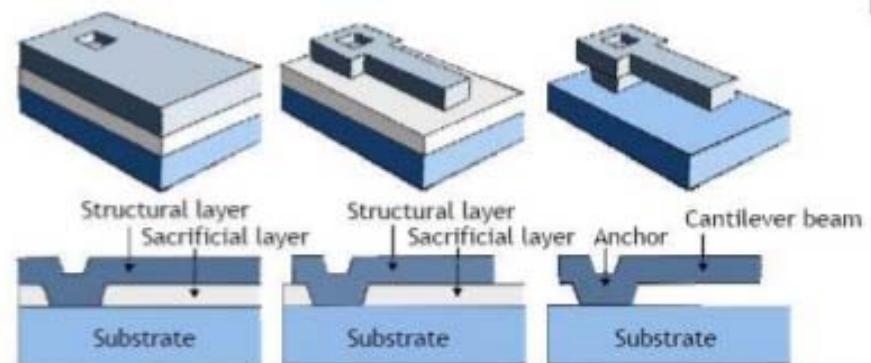
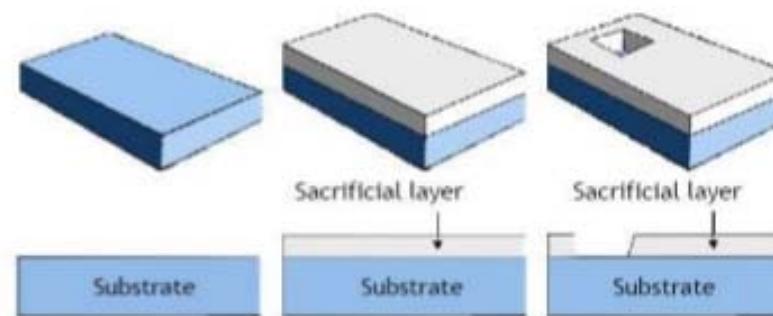
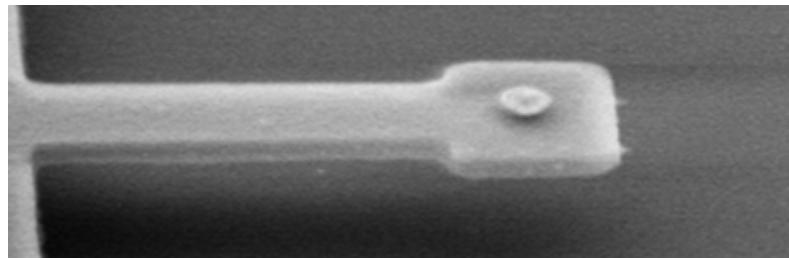
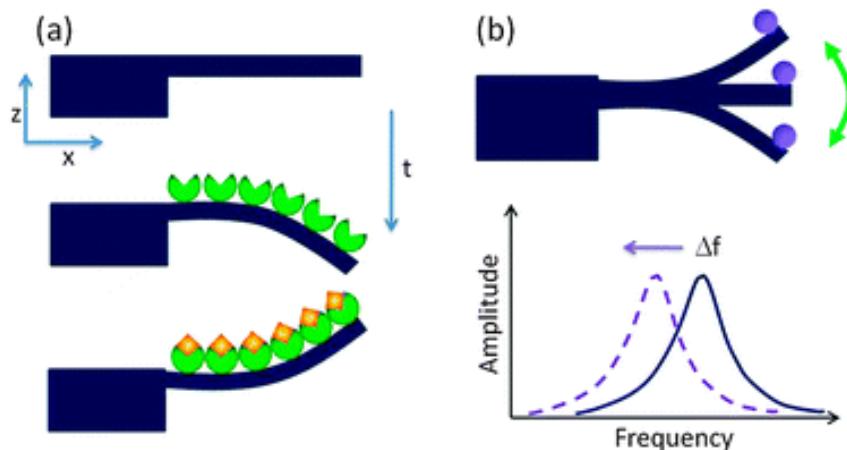


KONZOL

KONZOL – TÖMBI MIKROMECHANIKA



KONZOL FELÜLETI MIKROMECHANIKA

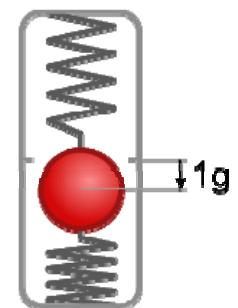
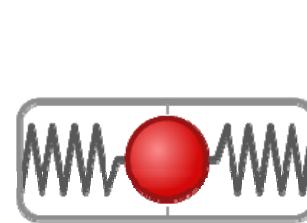




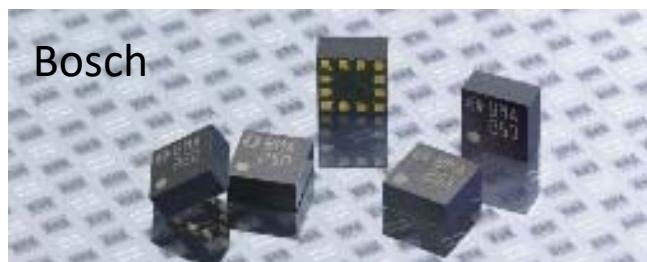
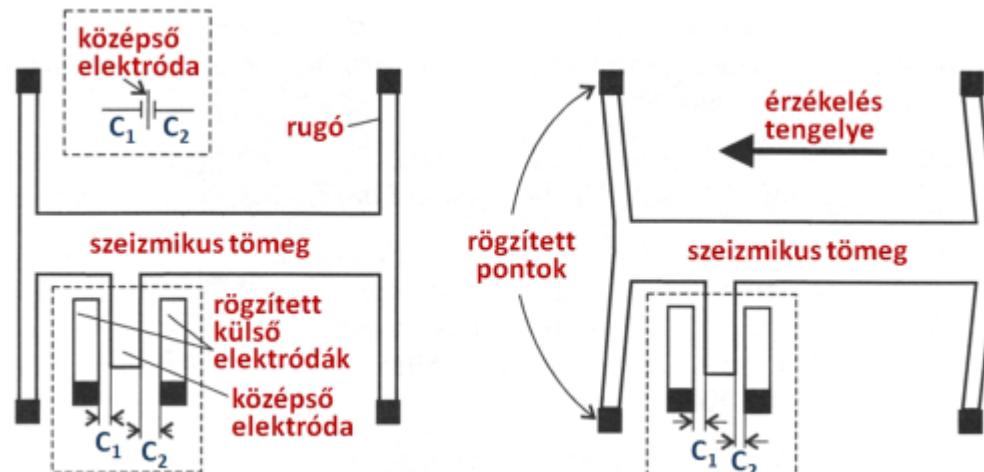
COMB DRIVE / GIRO

GYORSULÁS - GIRO

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése

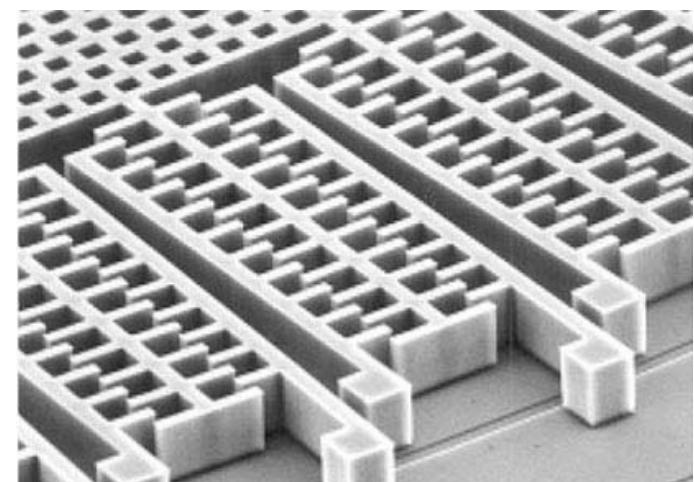


Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



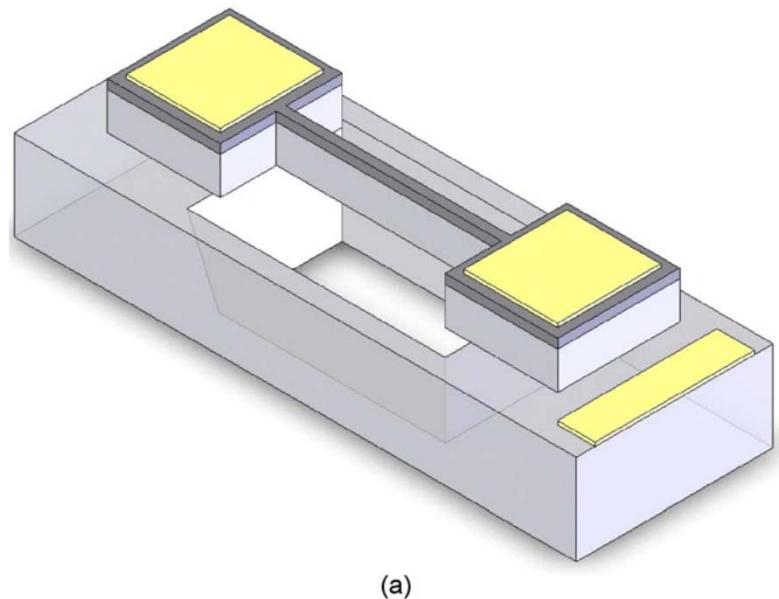
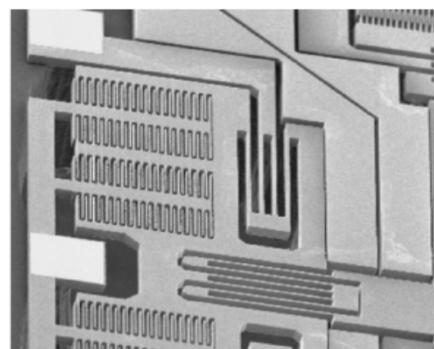
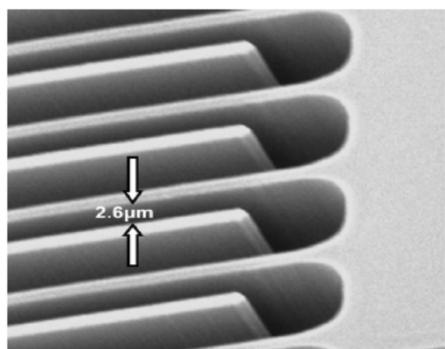
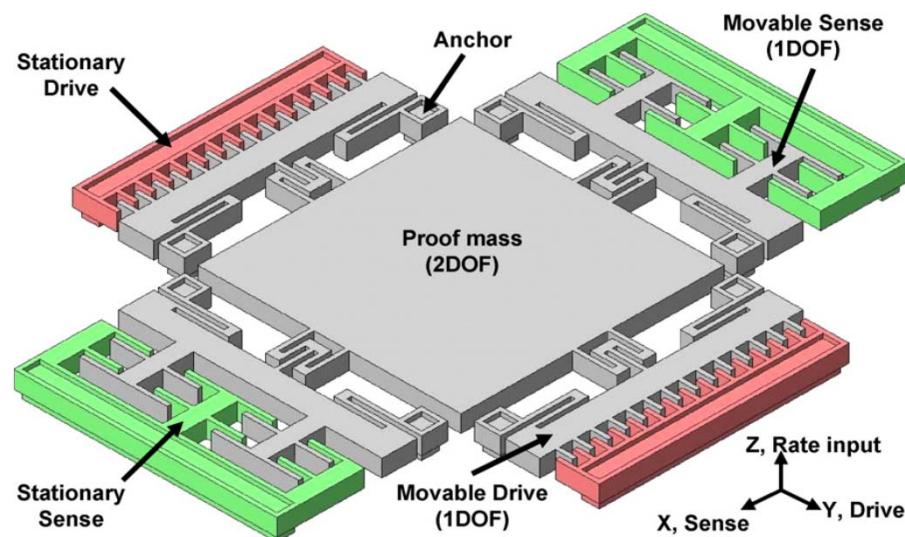
Párhuzamos elektródájú (síkkondenzátor) elrendezésben az érzékenység kis elmozdulások esetén:

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

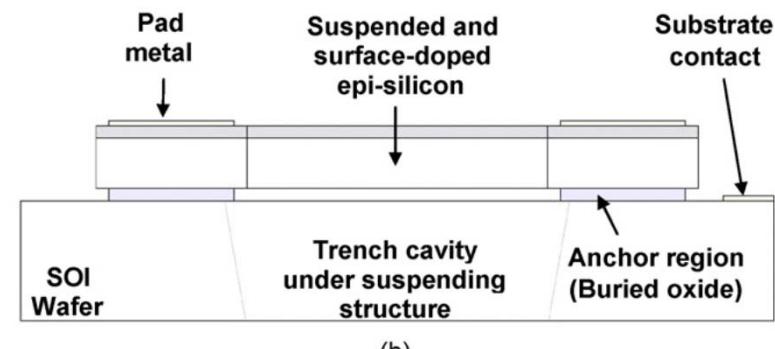


GIRO – TÖMBI MIKROMECHNAIKA

soi



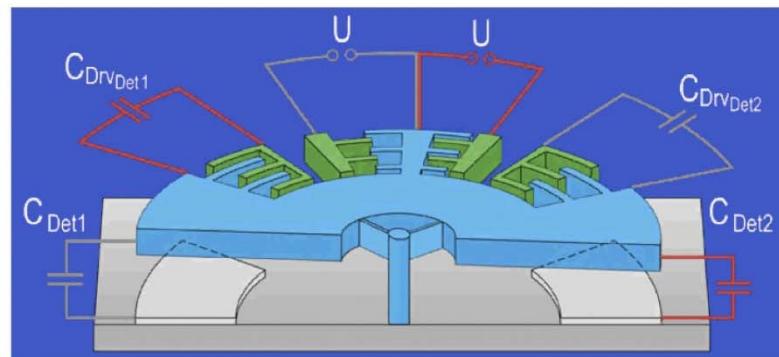
(a)



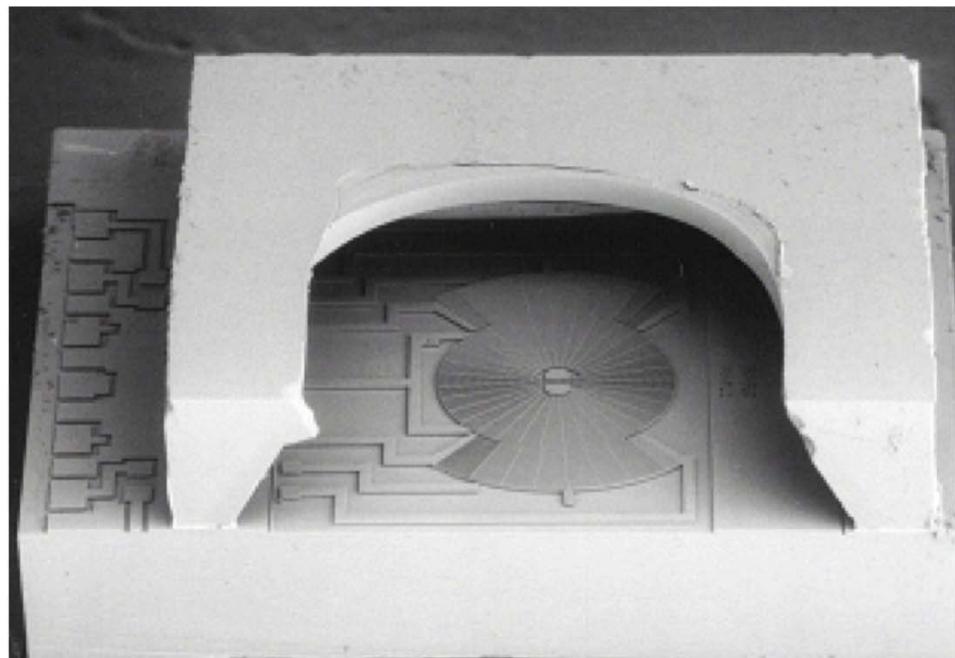
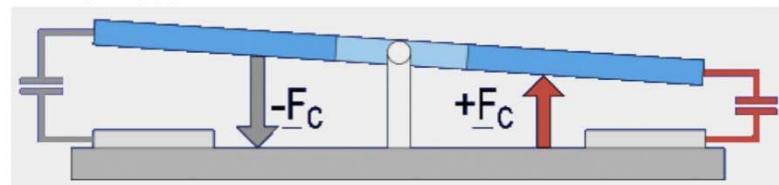
(b)

GIRO – FELÜLETI MIKROMECHNAIKA

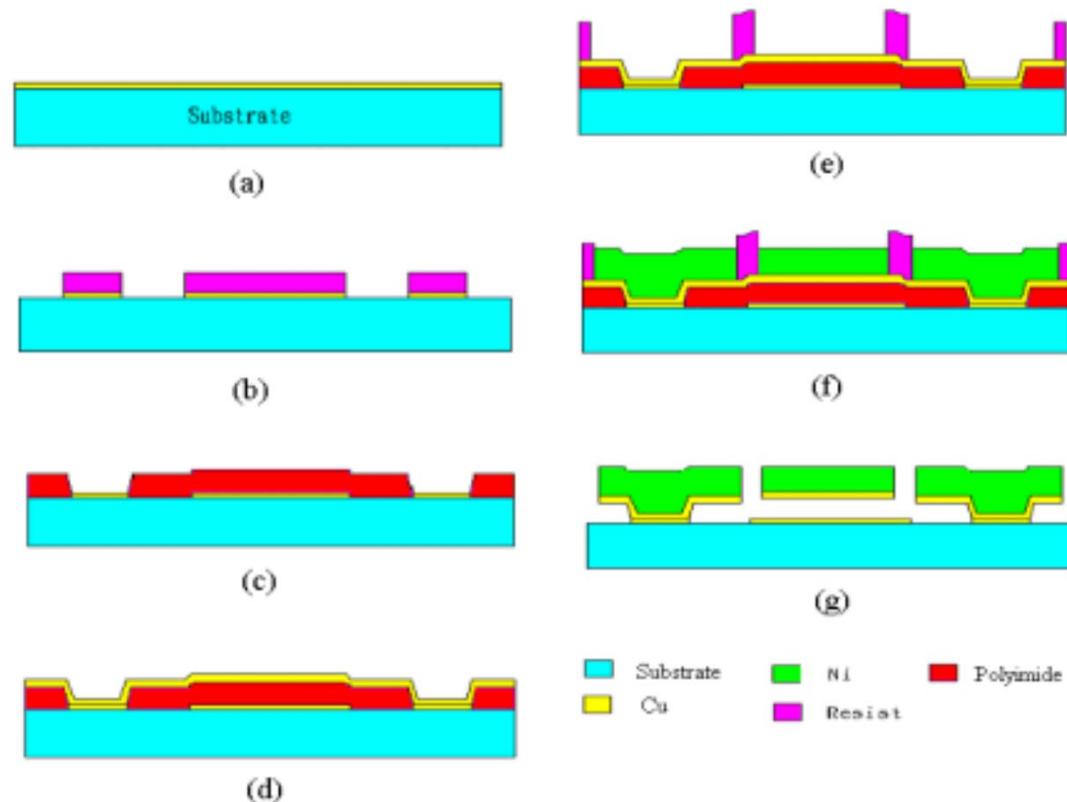
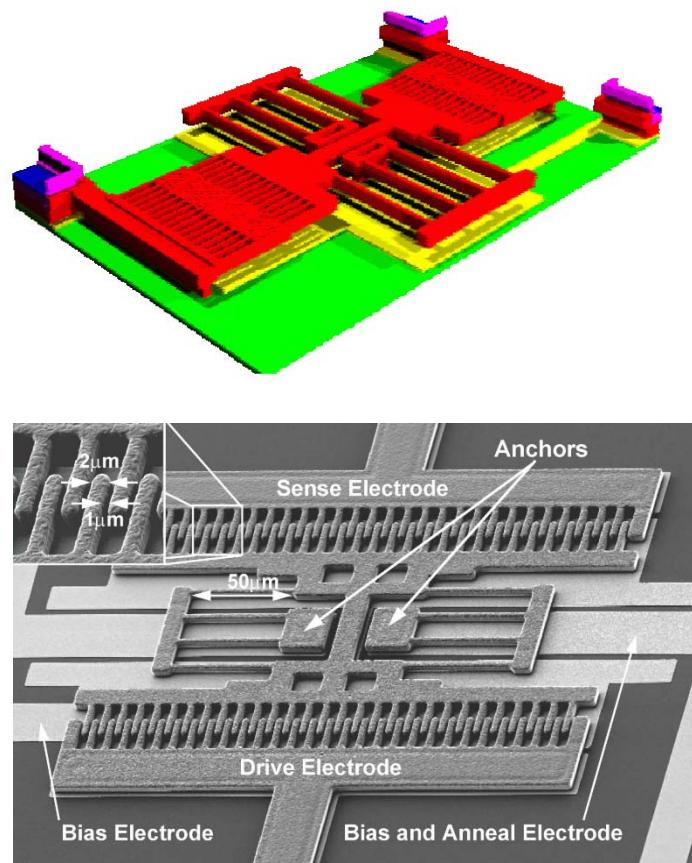
SOI



Drive mode



COMB DRIVE – FELÜLETI MIKROMECHANIKA

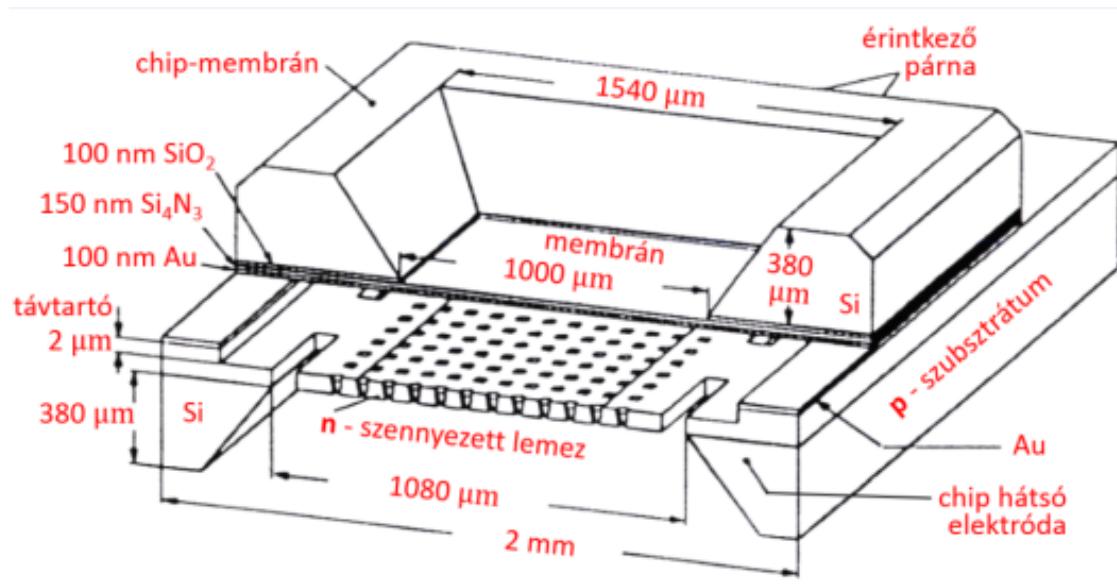




MIKROFON

MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



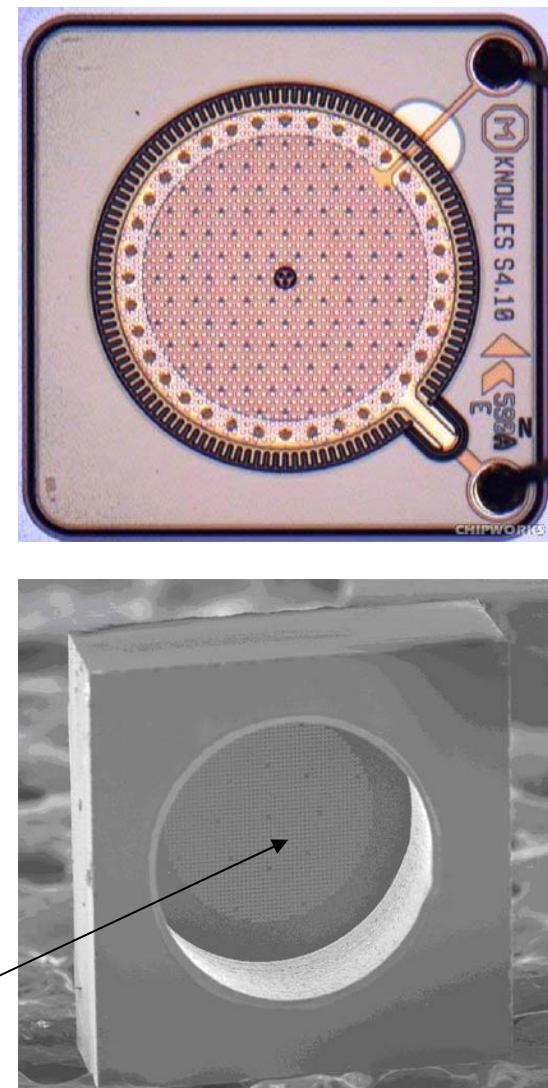
Felső elektróda: Au SiO₂ / SiNx membránon

Alsó elektróda: nSi

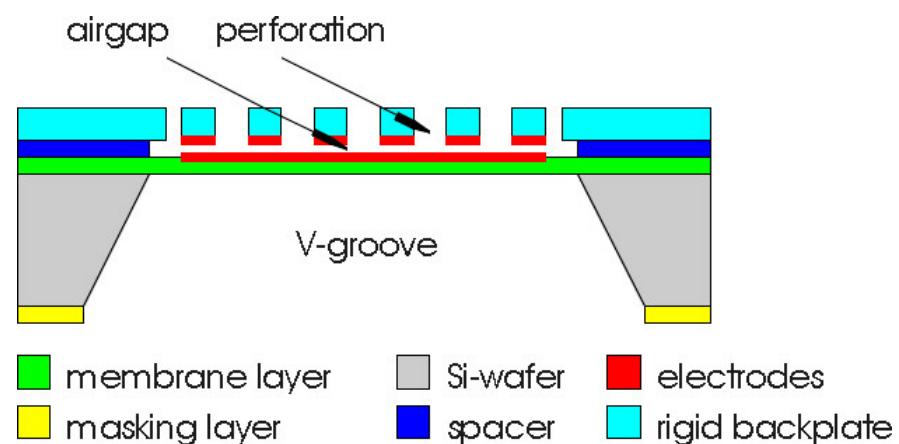
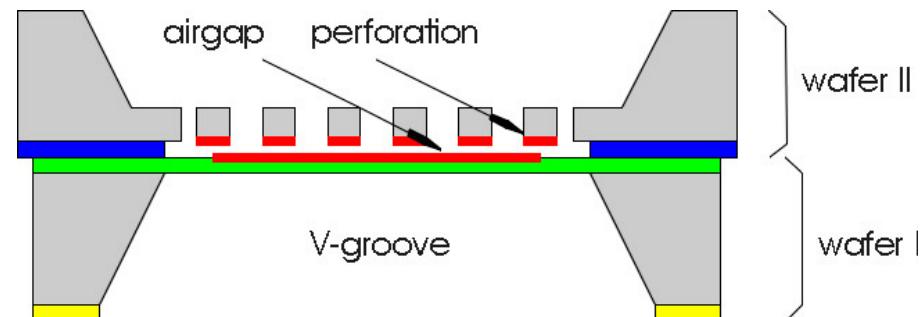
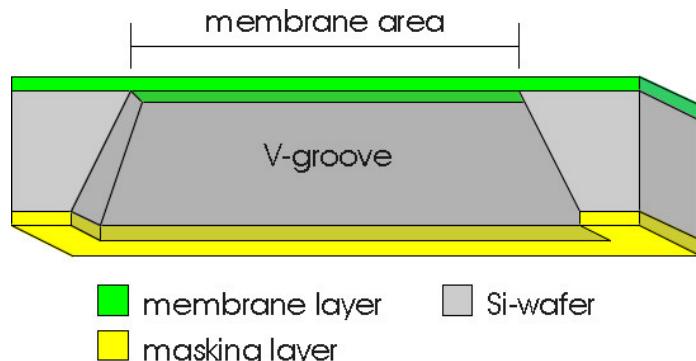
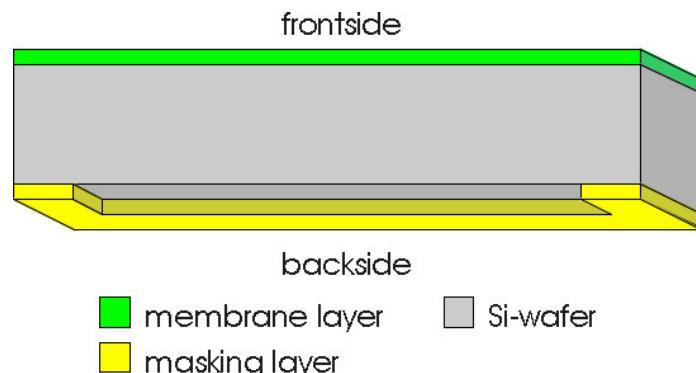
$$C_o = \epsilon \frac{A}{d}$$

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

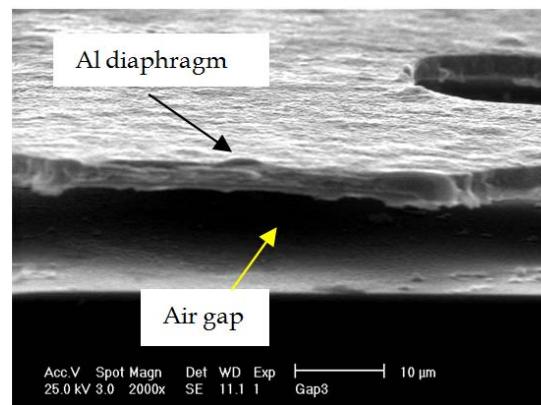
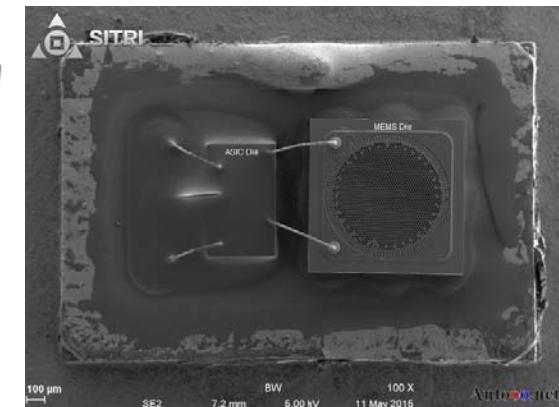
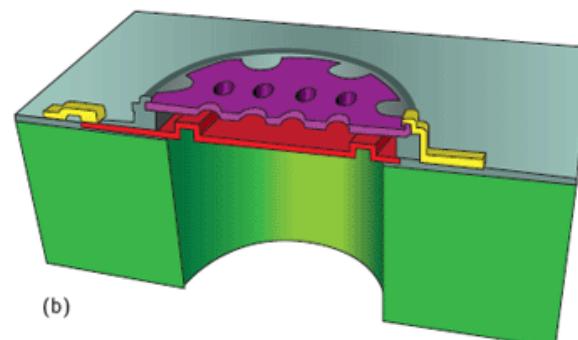
DRIE (mély reaktív ionmarással) mart membrán



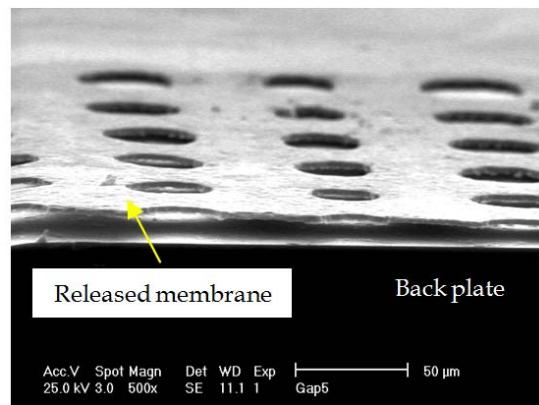
MIKROFON – TÖMBI MIKROMECHANIKA - KOH



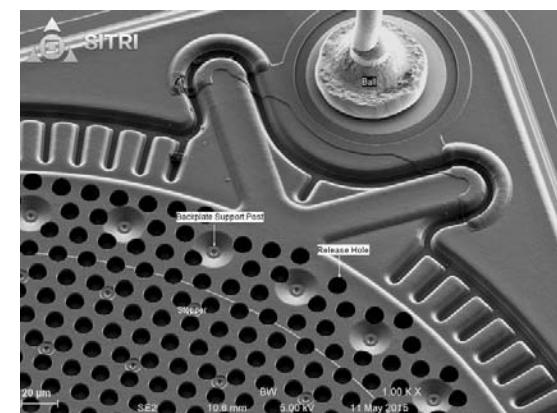
MIKROFON - TÖMBI/FELÜLETI KOMBO



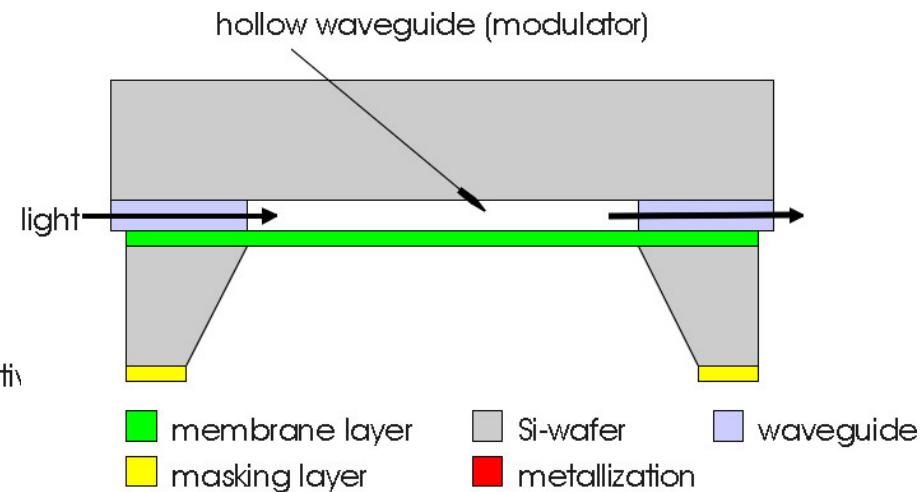
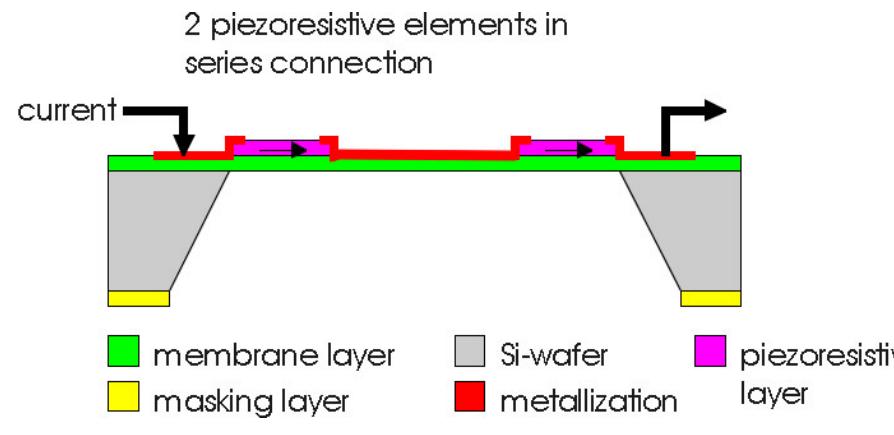
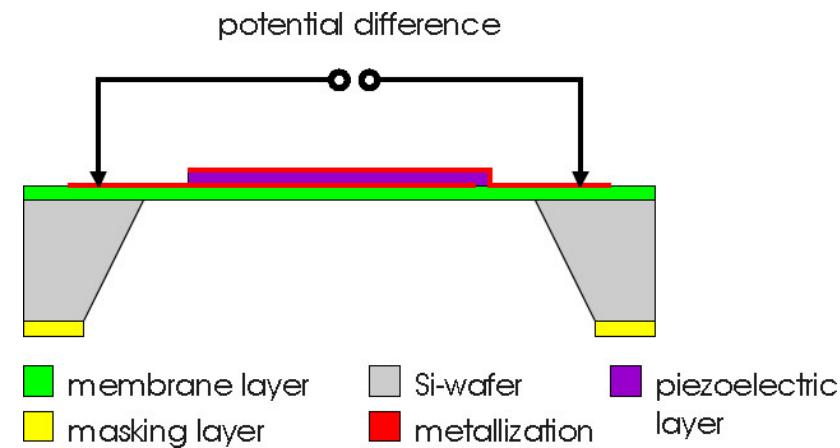
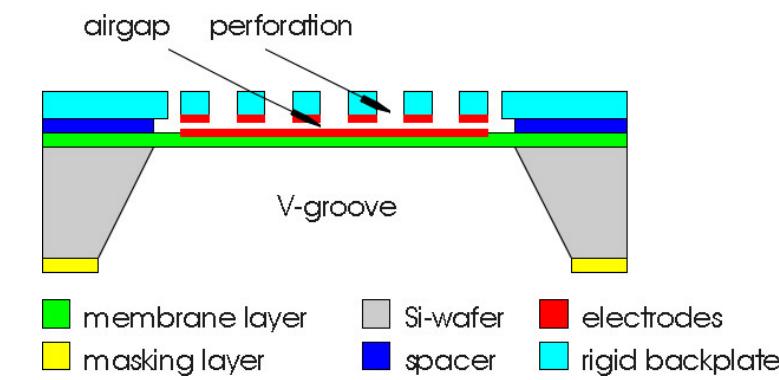
(a) Air gap of microphone



(b) Released membrane structure



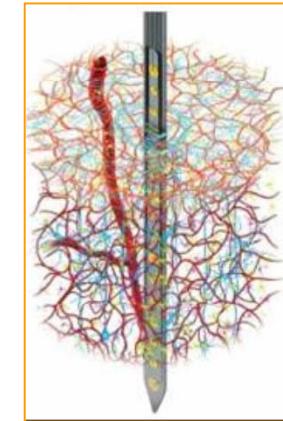
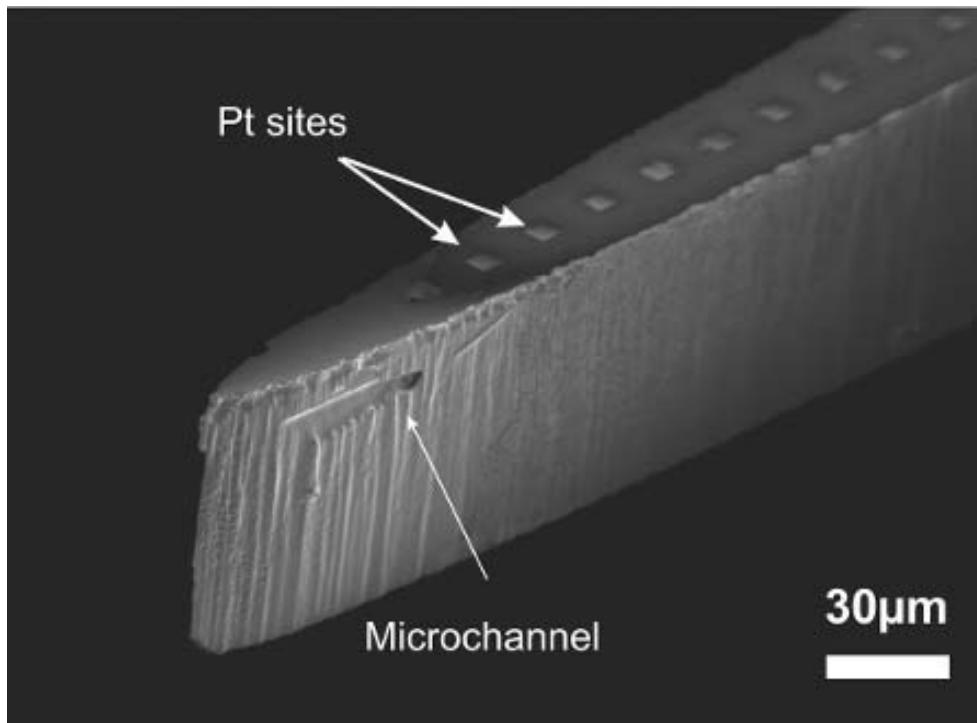
Nagyteljesítményű mikrofon szerkezetek





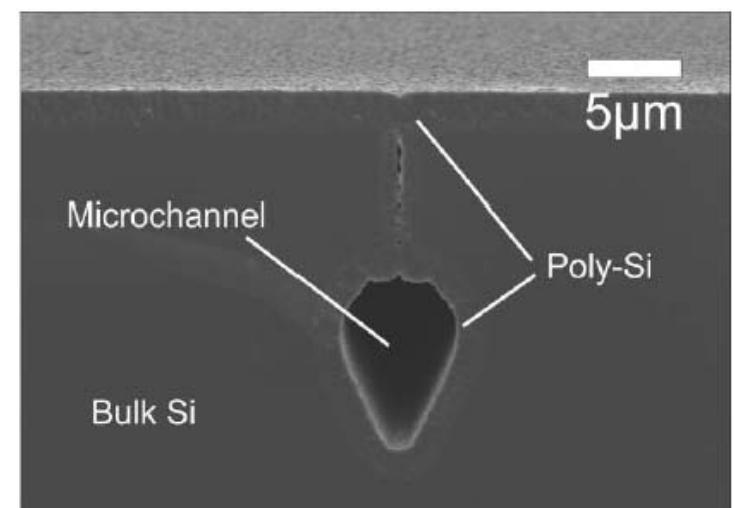
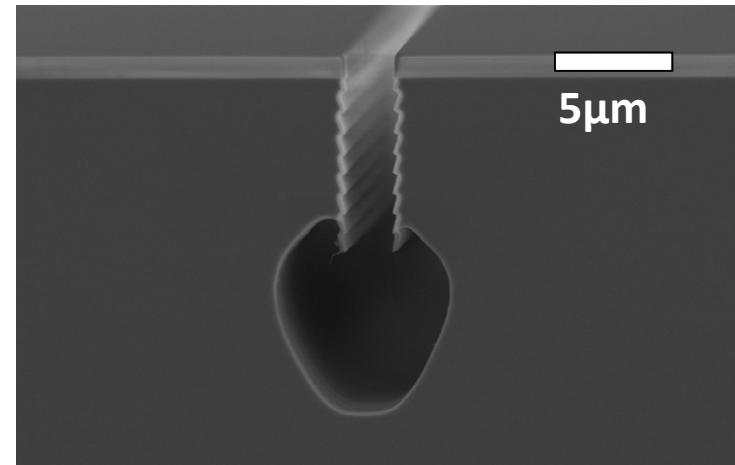
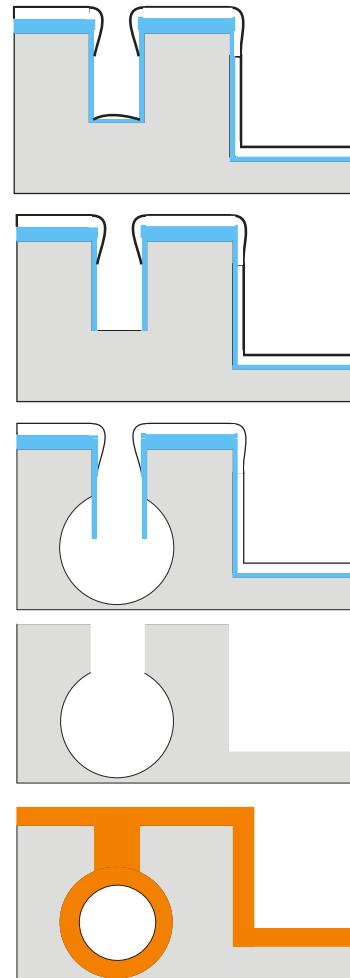
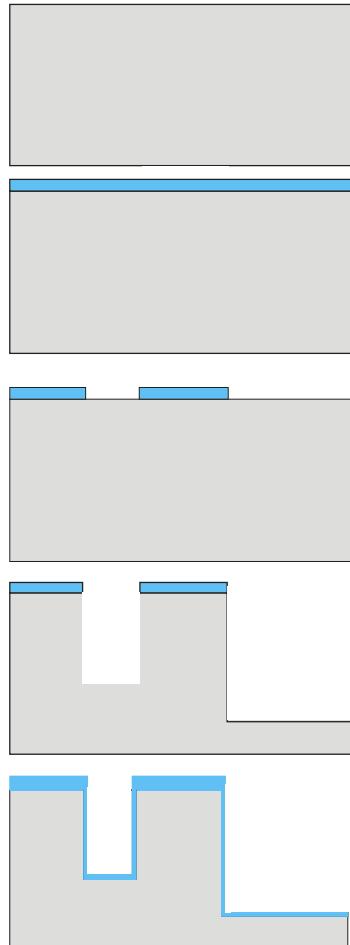
TÖMBI MIKROMECHANIKA: ELTEMETETT CSATORNA

Gyógyszeradagoló csatorna szilícium neurális elektródában



- Nagy átbocsájtó képességű csatorna hálózat egyetlen szubsztrátban
- Teljes tűtest 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),

Maszkilllesztő / 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, Cionix FIB nanoproCESSing system

SEM és fókuszált ionnaláb (FIB),

Gáz injektáló rendszer (GIS) (EBAD, IBAD)

és Energia Diszperzív Spektroszkóp (EDS)