

Mikrotechnológia: Rétegmarási technológiák



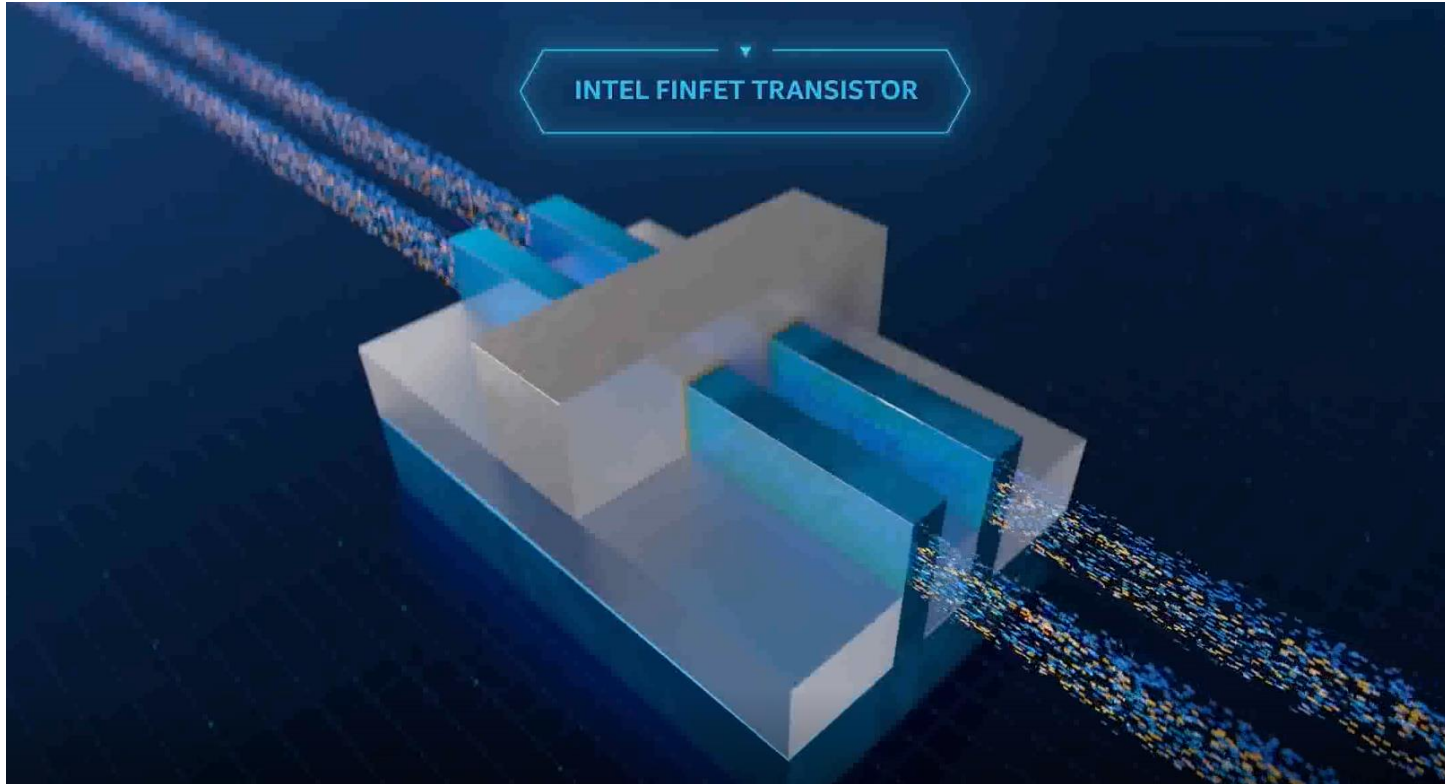
Dr. Fürjes Péter

ELKH Energiautudományi Kutatóközpont
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
Mikrorendszerek Laboratórium

E-mail: furjes.peter@ek-cer.hu

www.ek-cer.hu | www.memms.hu | www.biomeems.hu

SZILÍCIUM TECHNOLÓGIA: a homoktól a processzorig

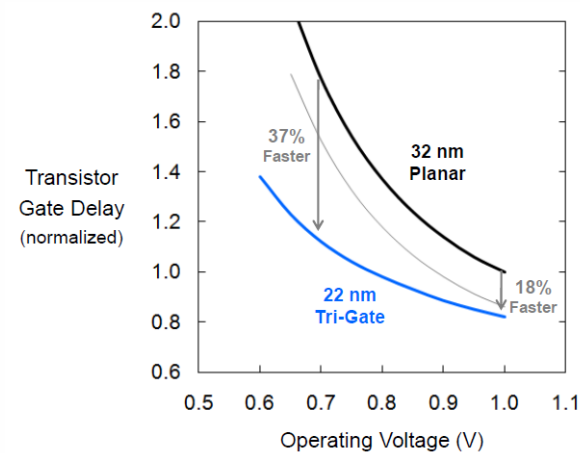
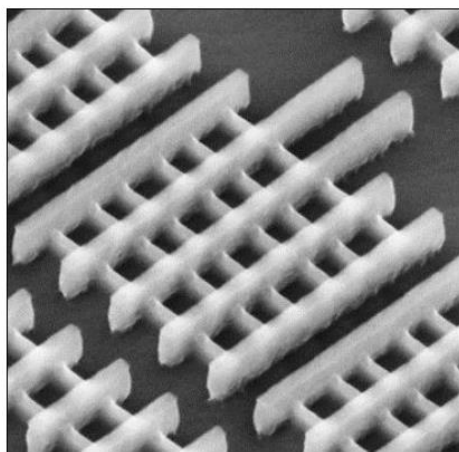
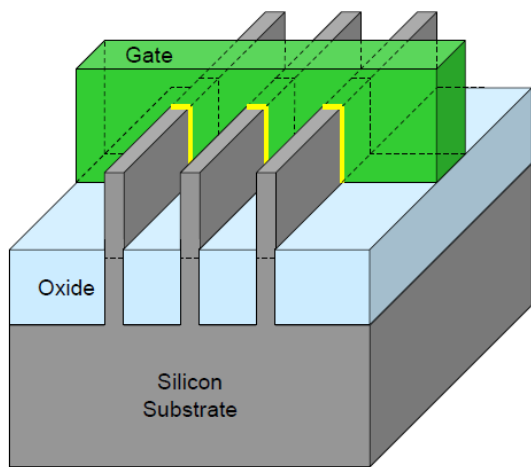
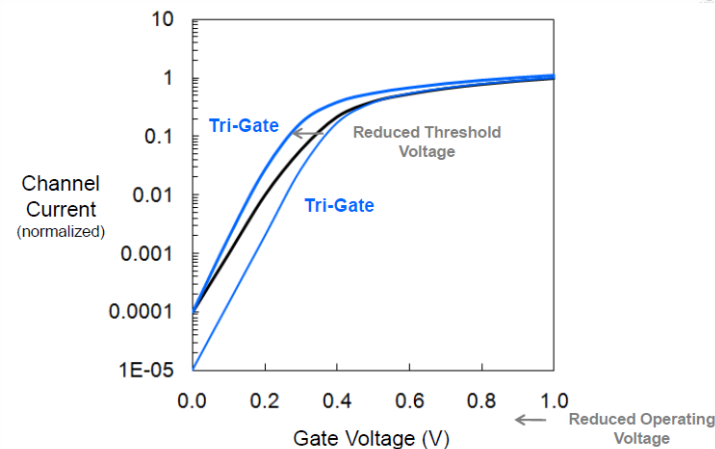
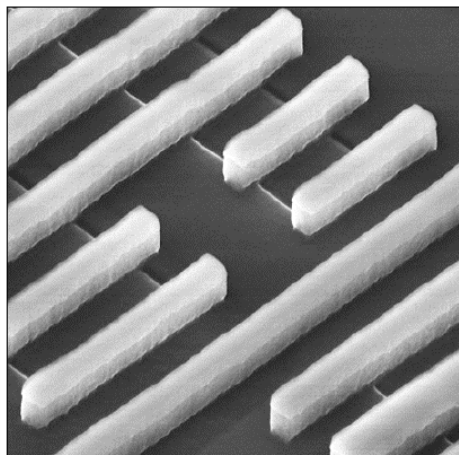
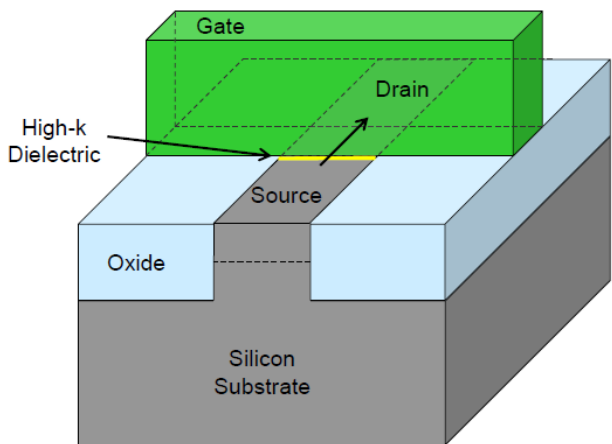


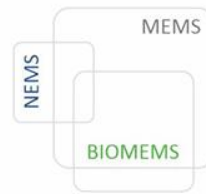
- Si egykristály (alapanyag)
- Litográfia - pozitív / negatív reziszt / lift-off
- Fizikai rétegleválasztások: porlasztás / gőzölés
- Kémiai rétegleválasztások: CVD / ALD

https://www.youtube.com/watch?v=_VMYPLXnd7E

- **Marások: nedves és száraz (plazma), kémiai / fizikai, izotróp / anizotróp**
- Magas hőmérsékletű műveletek
- MEMS 3D mikromechanika

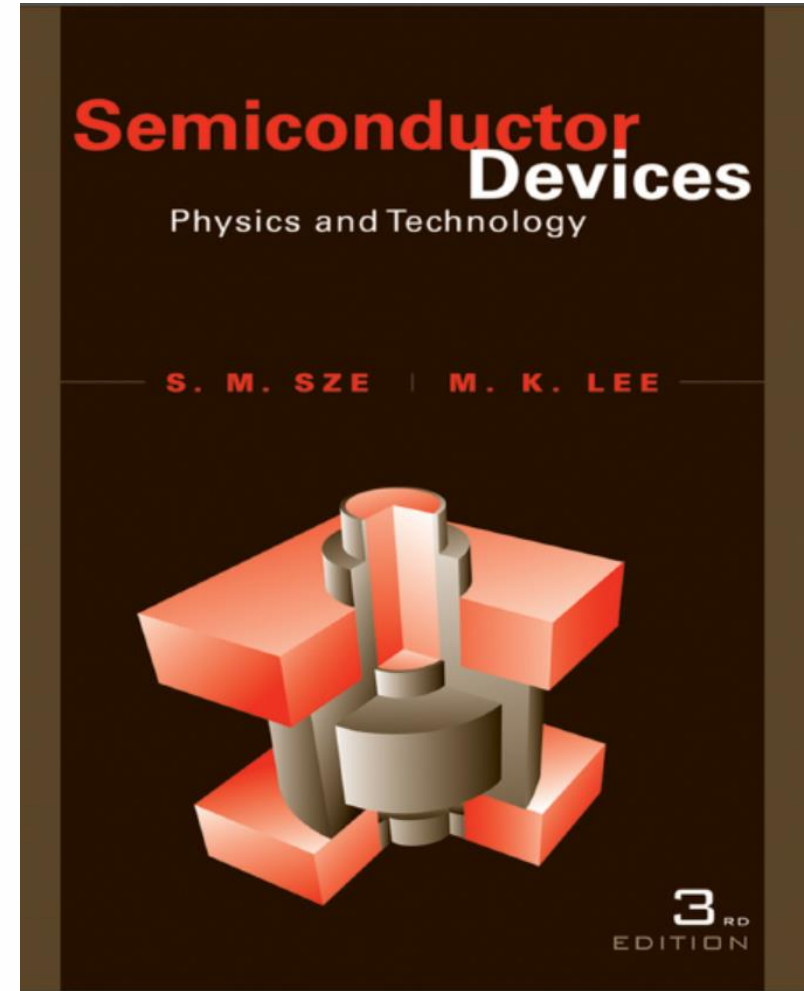
PLANÁR vs. 3D TRANZISZTOR





KULCS TECHNOLÓGIAI EREDMÉNYEK

Year	Technology ^a	Author(s)/Inventor(s)
1918	Czochralski crystal growth	Czochralski
1925	Bridgman crystal growth	Bridgman
1952	III-V compounds	Welker
1952	Diffusion	Pfann
1957	Lithographic photoresist	Andrus
1957	Oxide masking	Frosch and Derick
1957	Epitaxial CVD growth	Sheftal, Kokorish, and Krasilov
1958	Ion implantation	Shockley
1959	Hybrid integrated circuit	Kilby
1959	Monolithic integrated circuit	Noyce
1960	Planar process	Hoerni
1963	CMOS	Wanlass and Sah
1967	DRAM	Dennard
1969	Polysilicon self-aligned gate	Kerwin, Klein, and Sarace
1969	MOCVD	Manasevit and Simpson
1971	Dry etching	Irving, Lemons, and Bobos
1971	Molecular beam epitaxy	Cho
1971	Microprocessor (4004)	Hoff et al.
1981	Atomic layer deposition	Suntola
1982	Trench isolation	Rung, Momose, and Nagakubo
1989	Chemical mechanical polishing	Davari et al.
1993	Copper interconnect	Paraszczak et al.
2001	3D integration	Banerjee, et al.
2003	Immersion lithography	Owa, Nagasaka



SolidState Technology, Ramesh Ramadoss, MEMS devices for biomedical applications
<http://electroiq.com/blog/2013/10/mems-devices-for-biomedical-applications/>

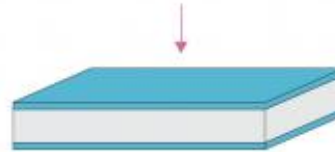
RÉTEGMEGMUNKÁLÁS



1 - Cleaning

Material is cleaned to remove all surface contamination. This provides a suitable surface for resist adhesion later in the process.

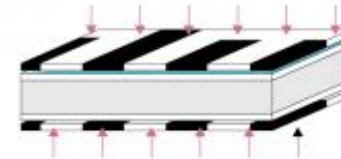
Photo sensitive coating



2 - Laminating

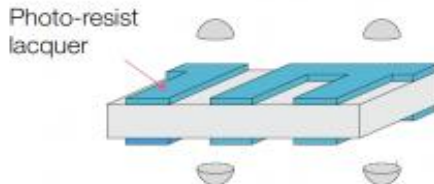
The cleaned metal 'blank' is then coated with a light-sensitive photoresist in a clean room.

UV light



3 - Exposing

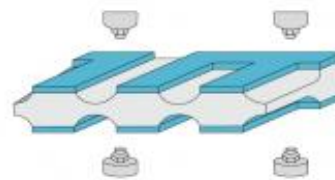
The metal sheet is then exposed to ultra-violet light, which hardens the photoresist.



4 - Developing

Unexposed areas are developed away, leaving behind the bare metal.

Etchant spray



5 - Etching

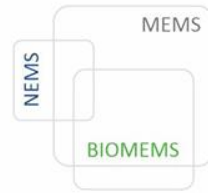
Etching chemistry is sprayed on both sides of the metal at high pressure. This accurately removes the unwanted metal.

Photo-resist removed

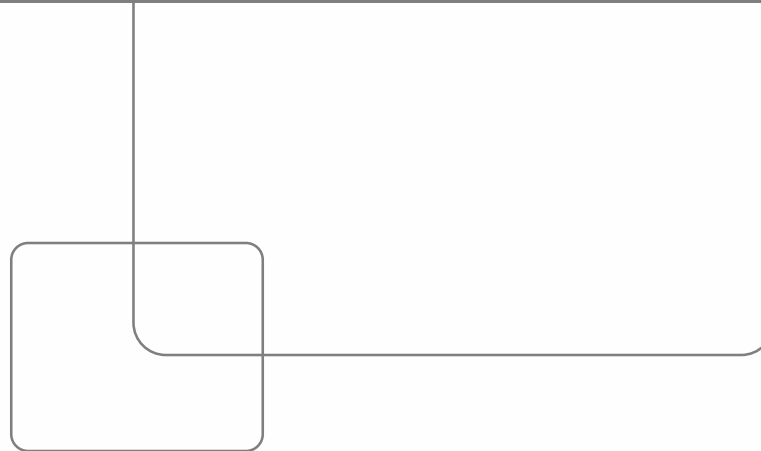


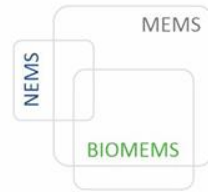
6 - Stripping

The resist is removed in the end to leave behind burr- and stress-free components.



SMART...

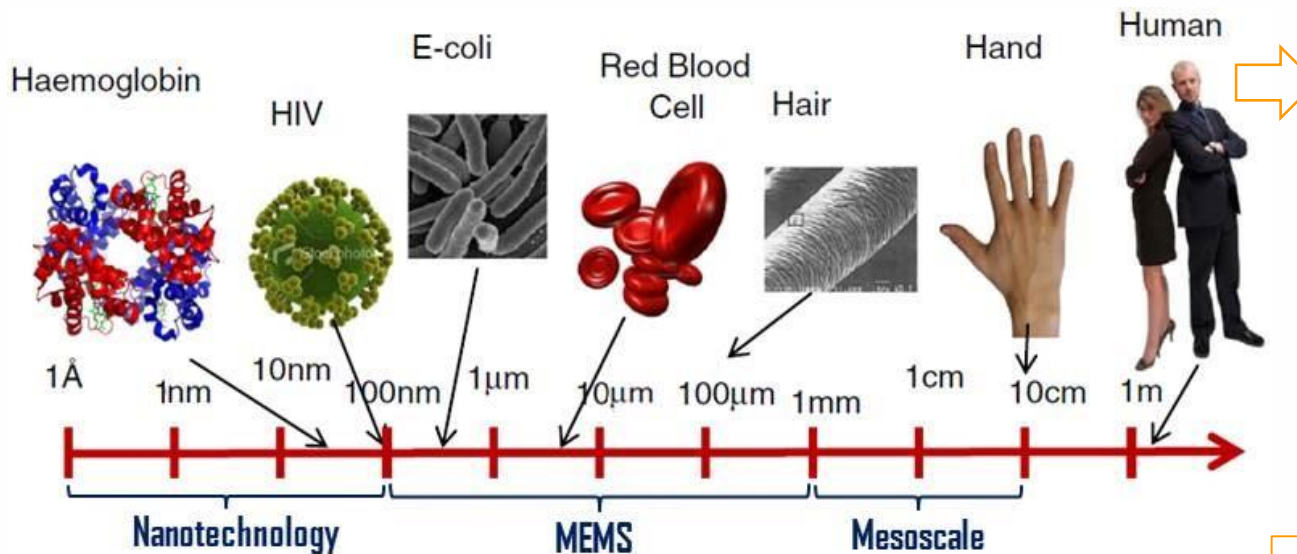




MEMS / ELŐNYÖK / TECHNOLÓGIA

Mikro-elektromechanikai rendszerek

Miniatürizált eszközök és rendszerek: 100nm és 1000µm közötti mérettartomány



- Nagy érzékenység
- Alacsony fogyasztás
- Integrálhatóság

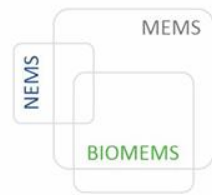
Fabrikációs technikák: SZILÍCIUM mikromechanika

- Litográfia
- Fizikai és kémiai rétegleválasztási eljárások (fémek, dielektrikumok)
- Nedves és száraz marások

Batch processes

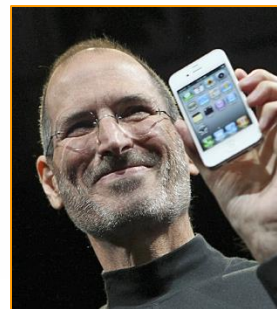
Alacsony költség

*SolidState Technology, Ramesh Ramadoss, MEMS devices for biomedical applications
<http://electroiQ.com/blog/2013/10/mems-devices-for-biomedical-applications/>*

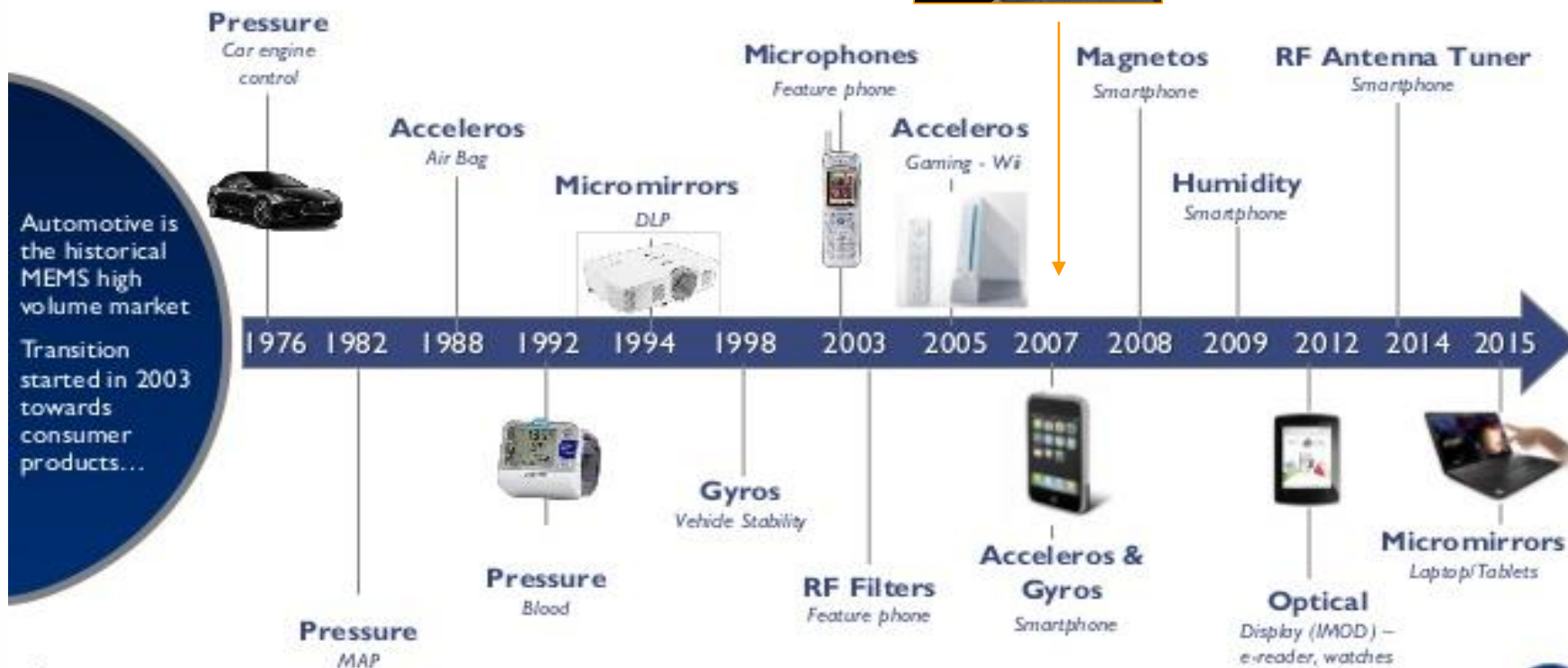


A MEMS ESZKÖZÖK TÖRTÉNETE

az autóipartól a kommunikációs elektronikáig

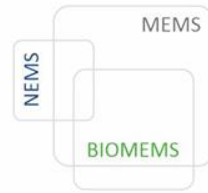


Steve Jobs
APPLE

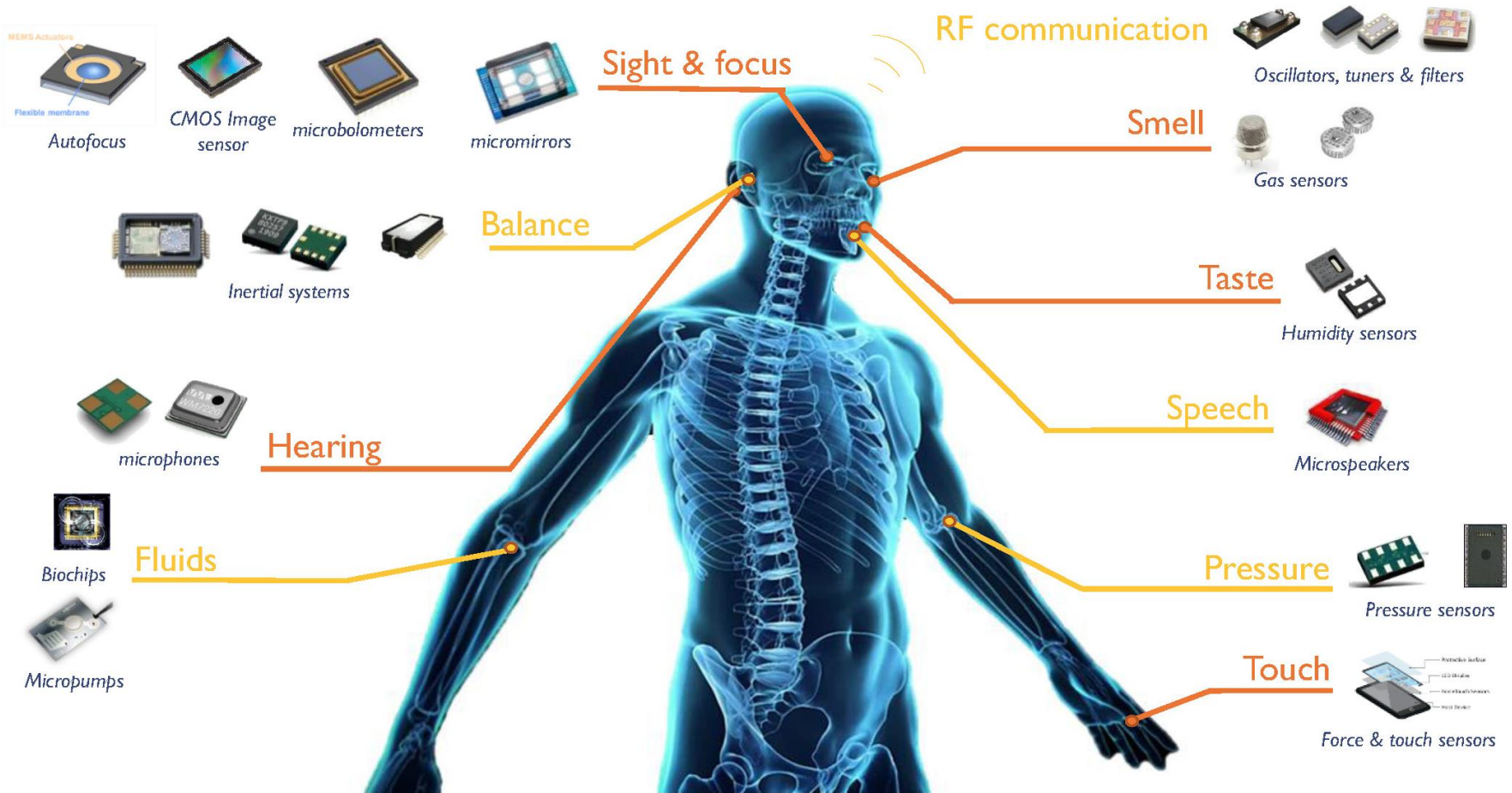


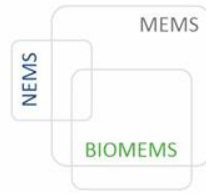
©2014 | www.wyole.hu | MEG Technical Congress Pfa th 2016



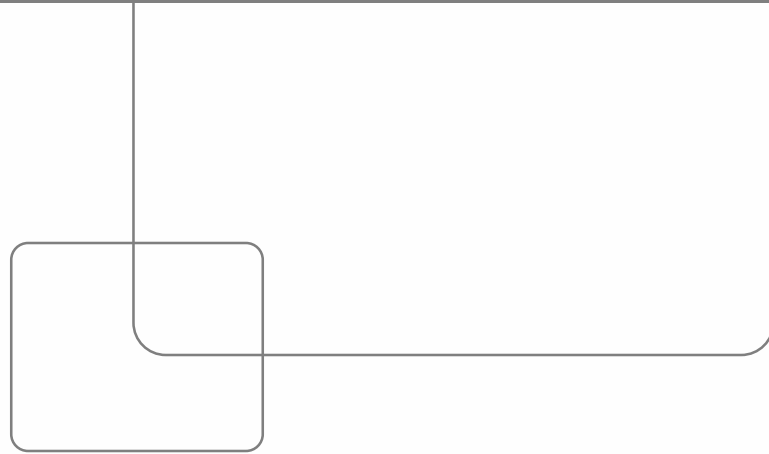


HOGYAN UTÁNOZZUK az EMBERI ÉRZÉKELÉST?

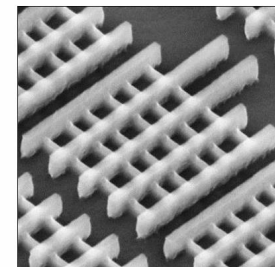
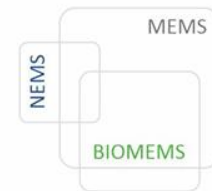
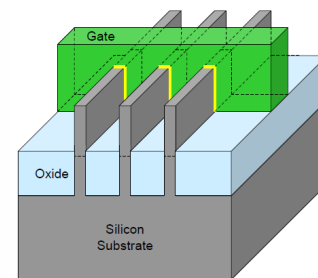




MIKROMECHANIKA



MIKROMECHANIKA



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

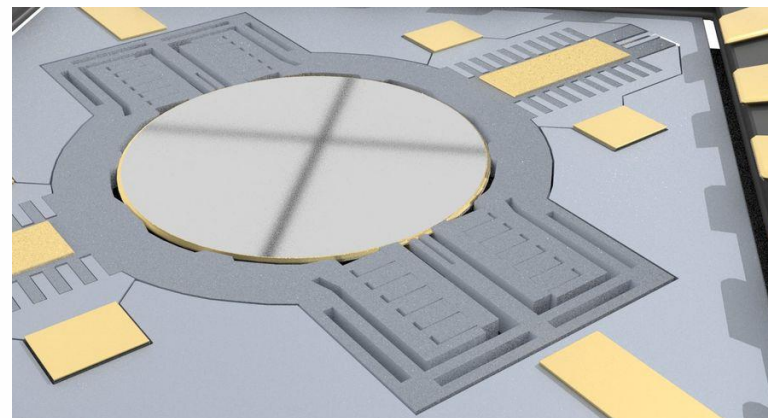
- membránok, felfüggesztett elemek, mozgó alkatrészek,
- mikrofluidikai alkalmazások: csatornák, üregek, reaktorok stb.

Mikromegmunkálás:

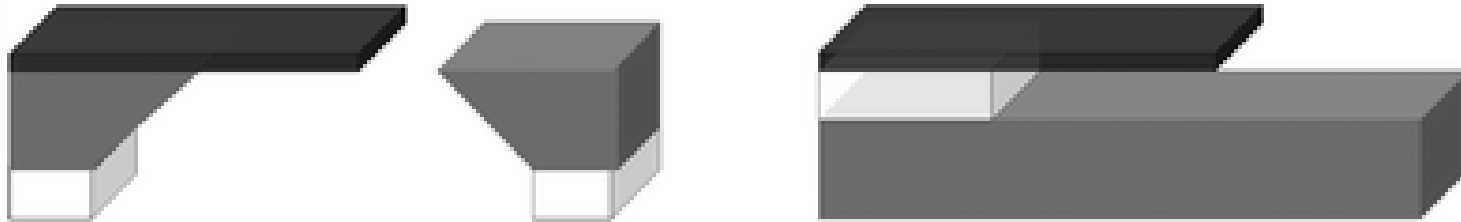
- eljárások és eszközök:
döntő többségében eltérnek a hagyományos mechanikai megmunkálásoktól
- elsősorban „száraz” ill. „nedves” kémiai marások és elektrokémiai módszerek, de klasszikus eljárások is lehetnek (lézer, v. gyémánttárcsás vágás)

jellemző méretek: 1-500 μm

Si kristály vastagsága 380-500-1000 μm



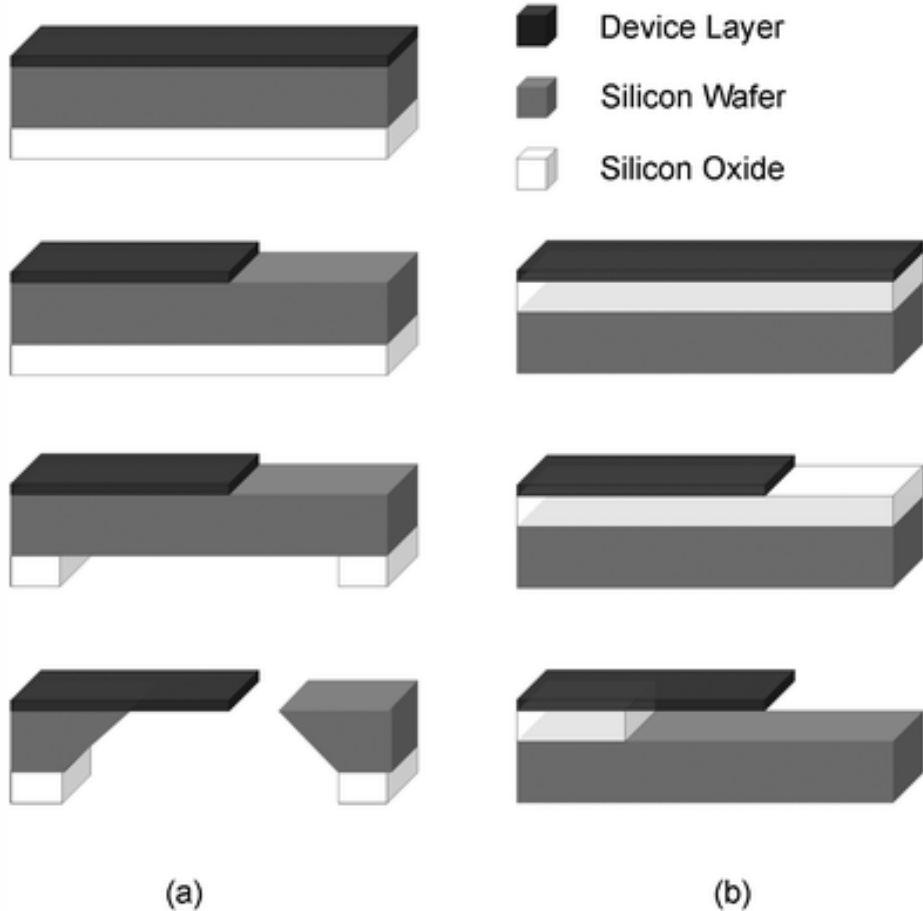
TÖMBI vs. FELÜLETI MIKROMECHANIKA



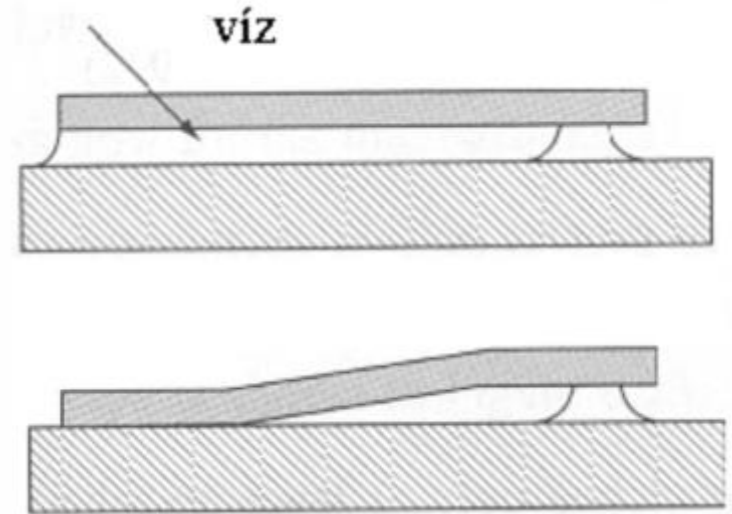
	Tömbi	Felületi
<i>Mérettartományok</i>	$2-3 \mu\text{m} < a < 100-500 \mu\text{m}$	$a < 2-3 \mu\text{m}$
<i>Termikus szigetelés</i>	+	-
<i>Mechanikai stabilitás</i>	+	-
<i>Membránok?</i>	egykristály	amorf v. polikristályos

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

TÖMBI vs. FELÜLETI MIKROMECHANIKA

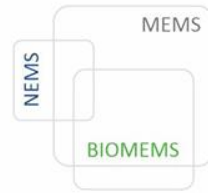


Jellegzetes hiba: letapadás

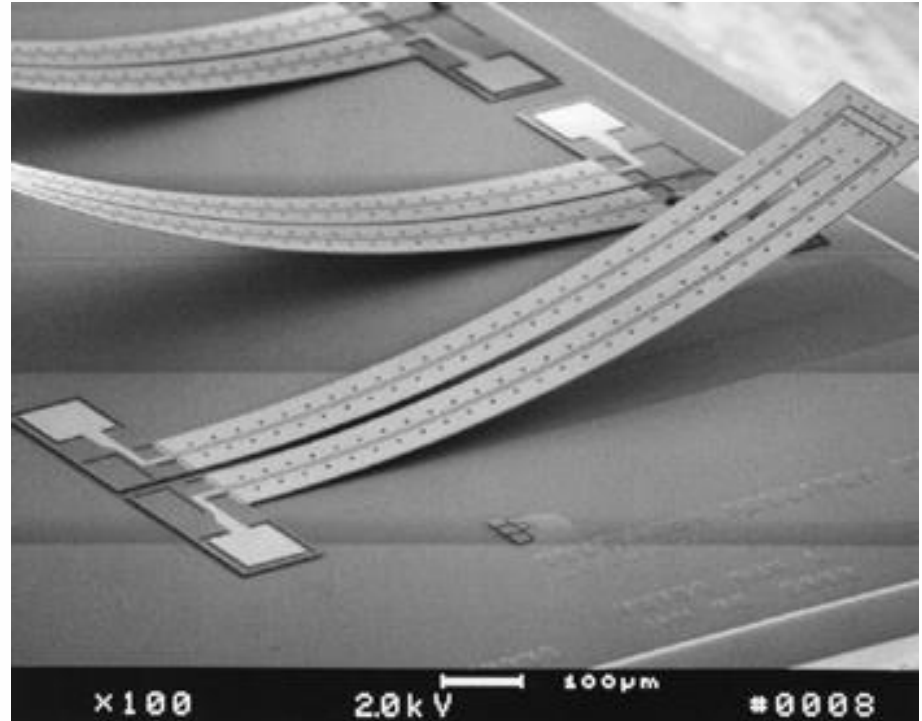
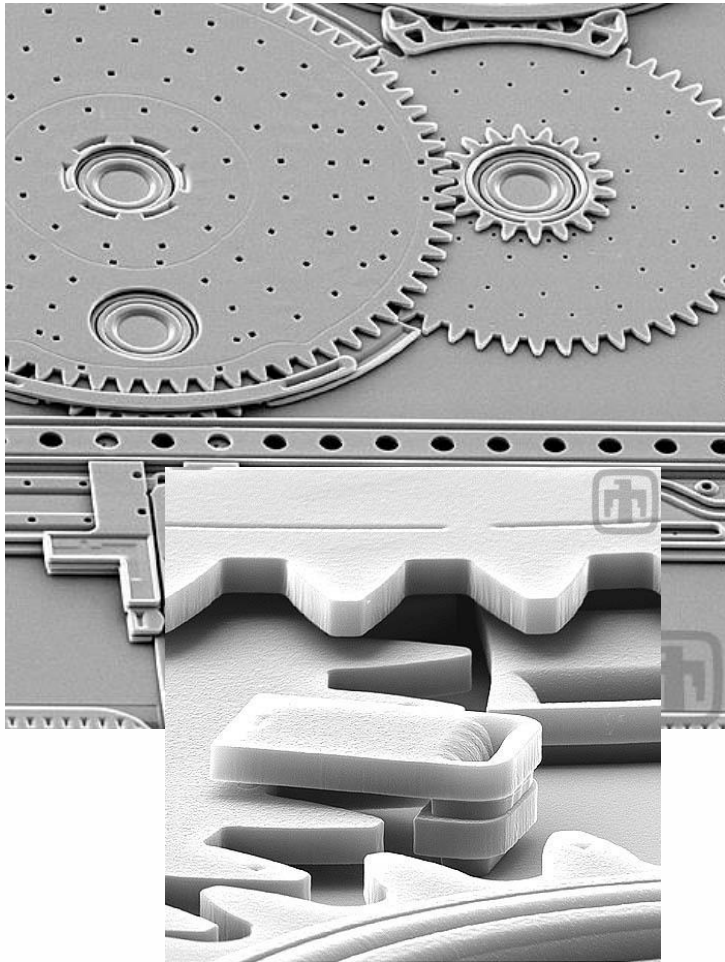


Megoldás:

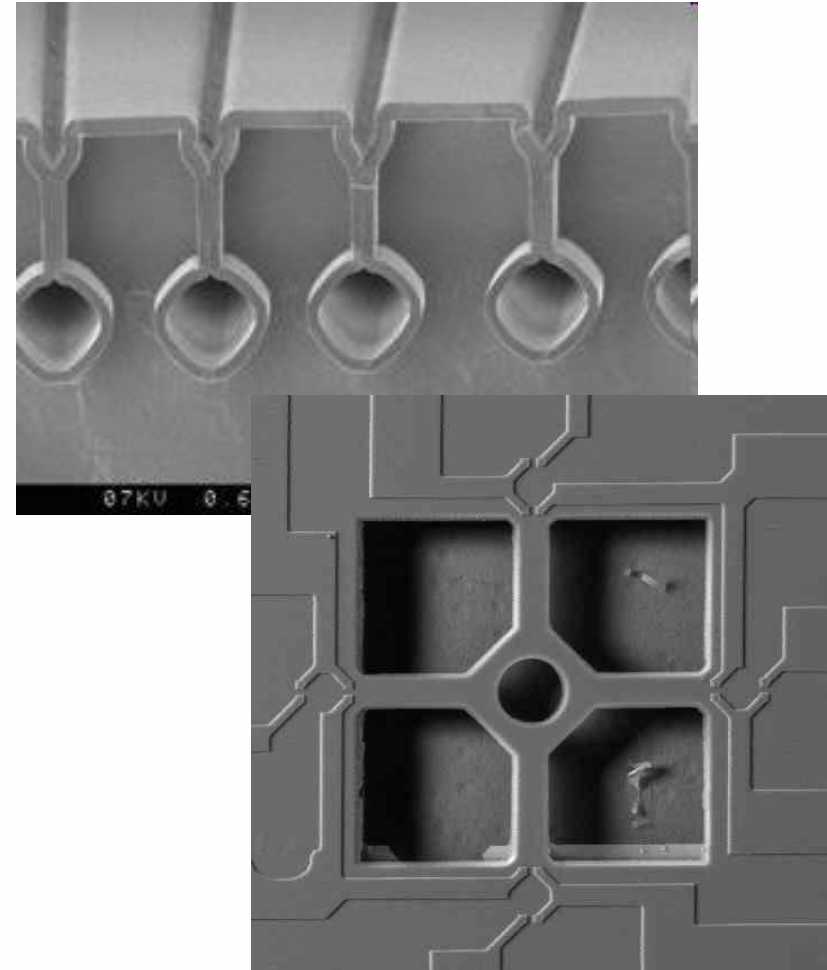
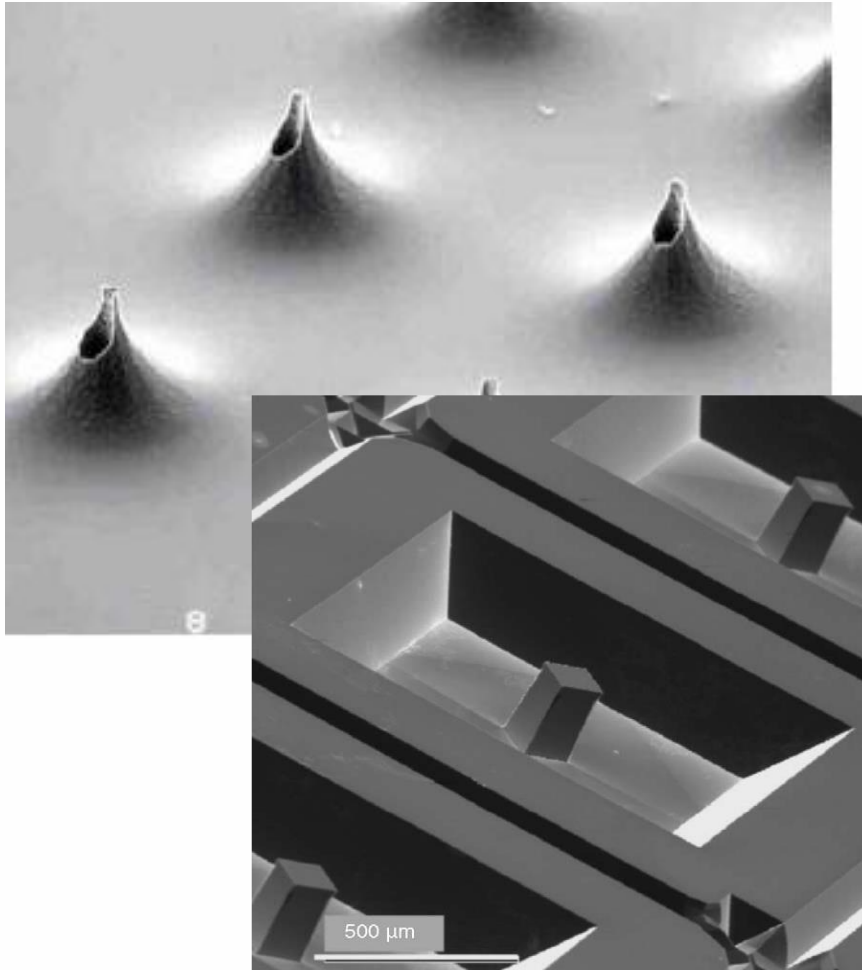
- beépített ütköző
- perforált alakzatok
- ... vagy száraz marások

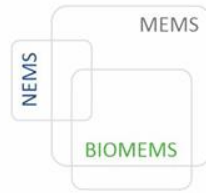


PÉLDA - FELÜLETI MIKROMECHANIKA

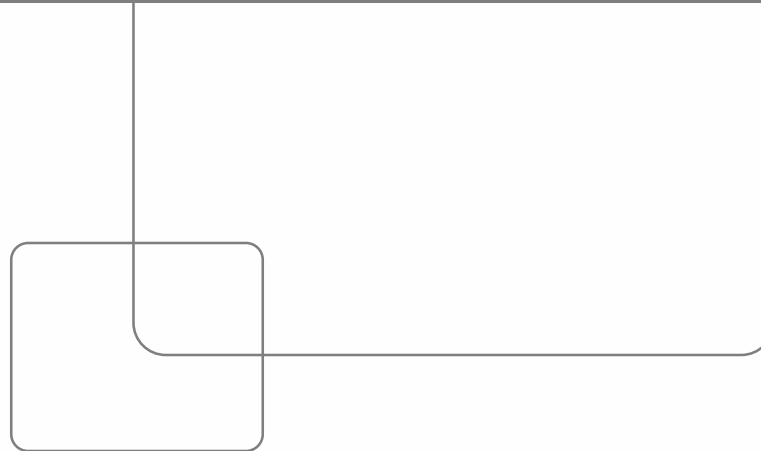


PÉLDA - TÖMBI MIKROMECHANIKA





MARÁSOK



KÉMIAI MARÁSOK

Marás: szilárd anyag eltávolítása a szubsztrátból kémiai reakció által

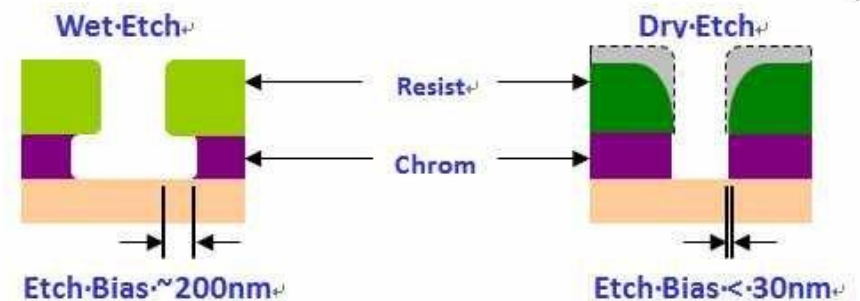
Reagens: folyadék vagy gáz (vagy gőz, plazma)

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** kísérettel 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**



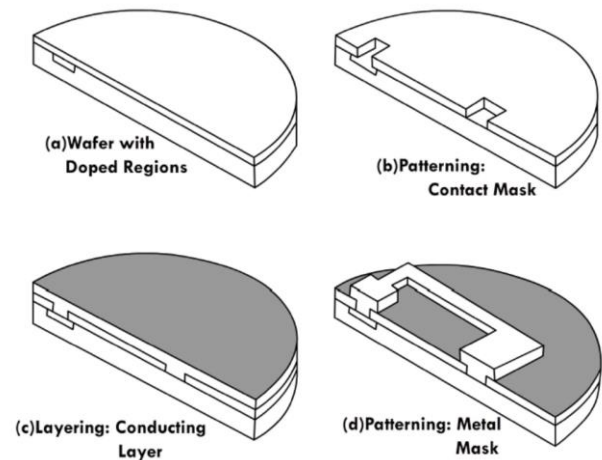
KÉMIAI MARÁSOK A FÉLVEZETŐIPARBAN

Félvezető szeletek kialakítása

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

Szeletprocesszálás

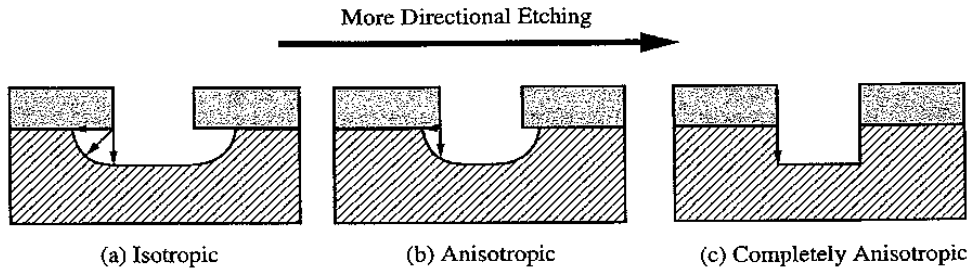
- Fotoreziszt hívás
- Oxidok és nitridek szelektív vagy teljes eltávolítása
- Fémek mintázása
- Szerves rétegek szelektív vagy teljes eltávolítása
- Kontúr marás: tervezett alámarási profil
- Si anizotróp marása MEMS szerkezetekben
- Polikristályos Si marása MOS szerkezetekben (poly-gate)



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

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

MARÁSOK SZEREPE A MIKROMECHANIKÁBAN

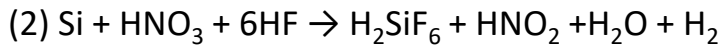
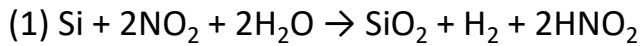


Cél:
3D struktúra kialakítása

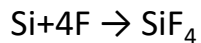
Nedves marás

- Folyékony marószer
- Kémiai folyamat

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



Si száraz marása halogén alapú plazmákban:



Száraz marás

- Gáz fázisú marószerből plazma
- Kémiai és fizikai folyamat

	Wet Etch	Dry Etch
Profile		
Etchant	Chemical	Ionized Gas
Minimum Features	> 2µm	> Single nm
Selectivity	High > 100x	Low < 10x
Throughput	High (Batch)	Low (Single Wafer)

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

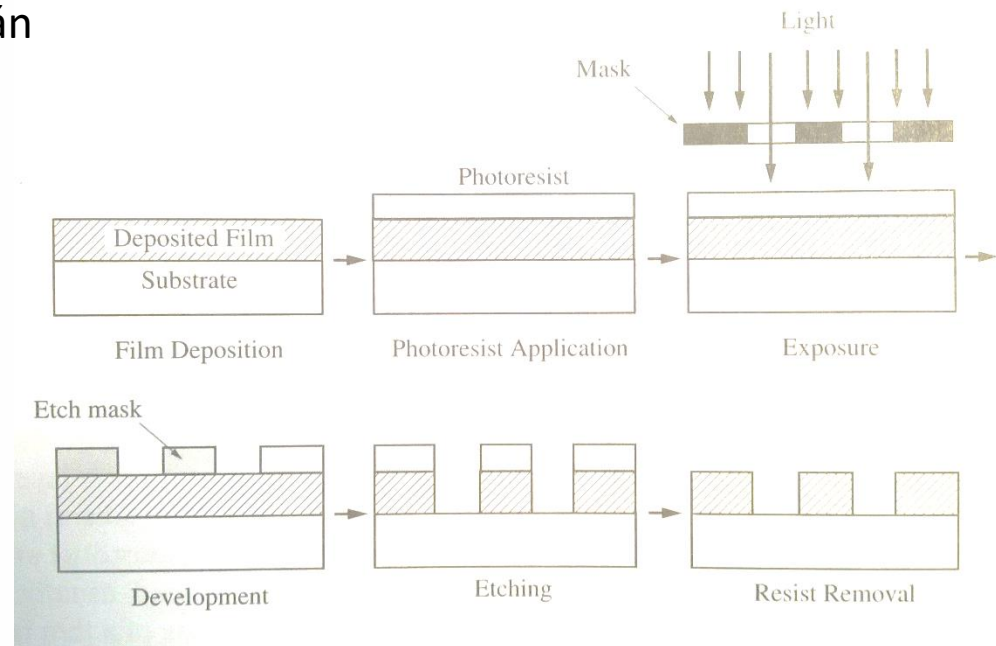
Mintázat leképezése

Előny:

- effektivitás
- megbízhatóság
- egyszerűség
- szelektivitás
- gazdaságosság

Hátrány:

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



NEDVES KÉMIAI MARÁSOK – TECHNOLOGIA





KÉMIAI MARÁSOK

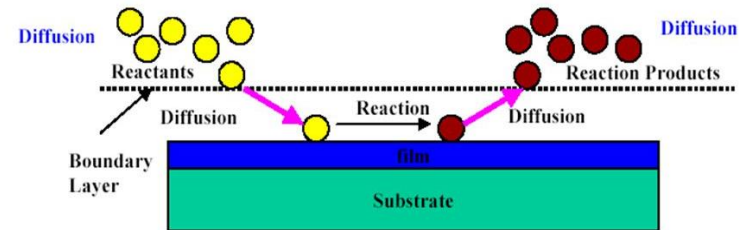
A marási eljárásokkal szemben támasztott követelmények:

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

NEDVES MARÁSOK 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 / mozgató sebessége

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

- Szennyező típus és koncentráció
- Kritálytani orientáció
- Hőmérséklet

NEDVES MARÁSOK KÉMIAJA

Marási sebességet befolyásoló faktorok

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

Kémiai marószerek tisztasága:

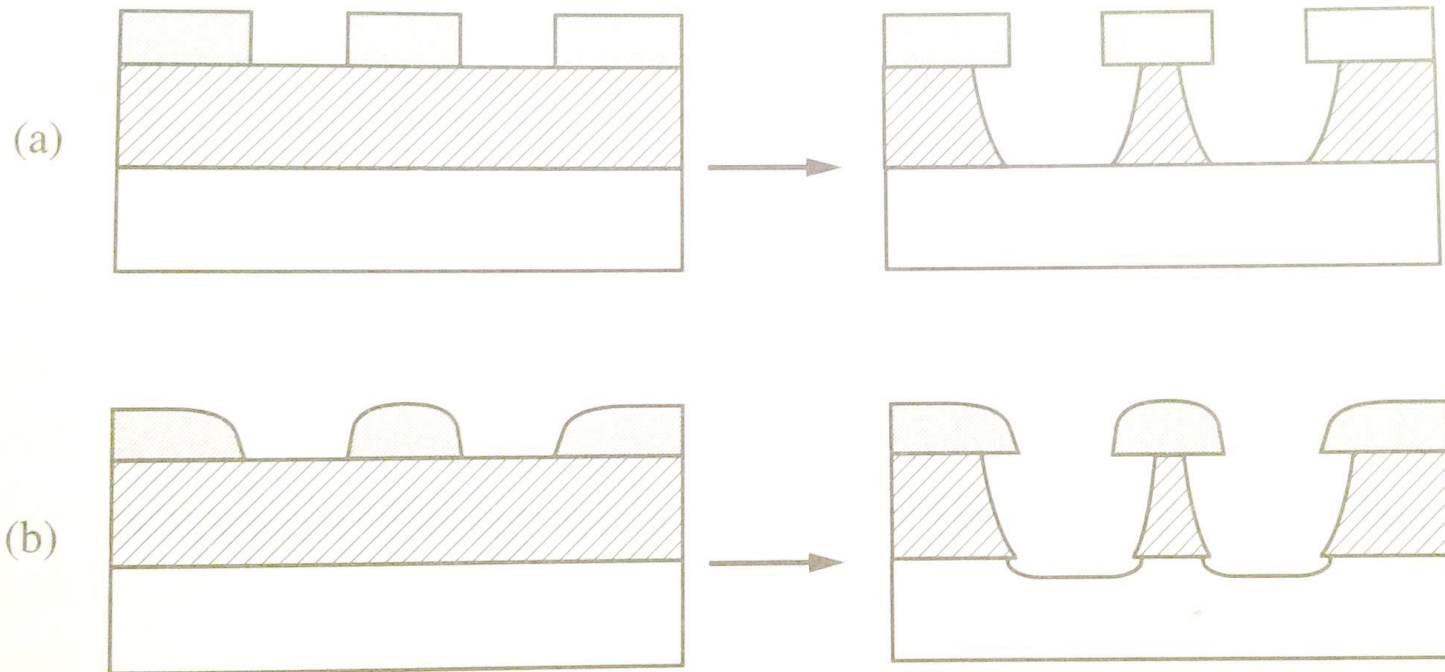
- Analitikai minőség: ppm szennyezőkoncentráció
- Elektronikai minőség: ppb szennyezőkoncentráció
- MOS minőség: alacsony Na koncentráció
- Ultra VLSI minőség (nagyon drága)
- DI víz: ppm szennyezőkoncentráció

NEDVES MARÁSOK SEBESSÉGFÜGGÉSE

Szelektivitás:

A marási sebesség anyagfüggése

(nagyon fontos pl. maszkoló anyagra és a szubsztrátra 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

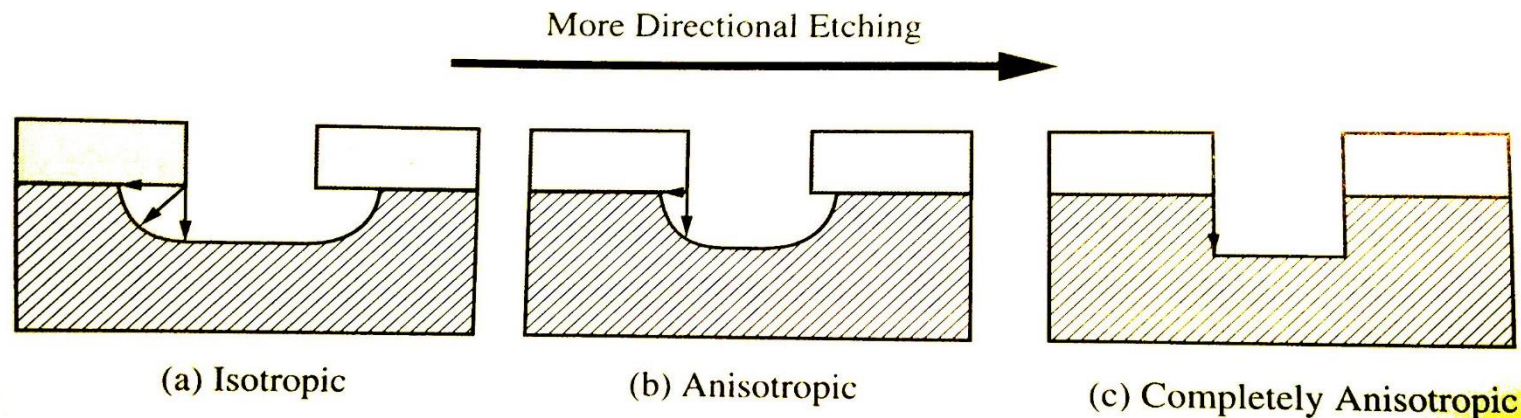
NEDVES MARÁSOK SEBESSÉGÉNEK IRÁNYFÜGGÉSE

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

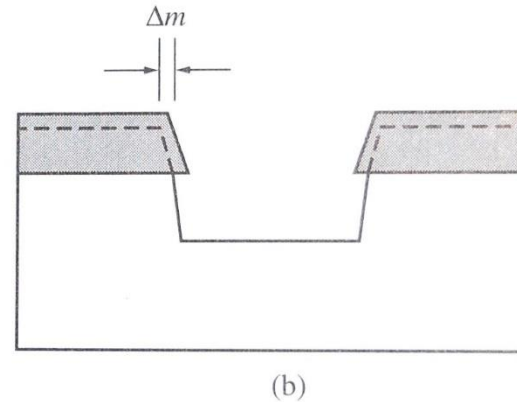
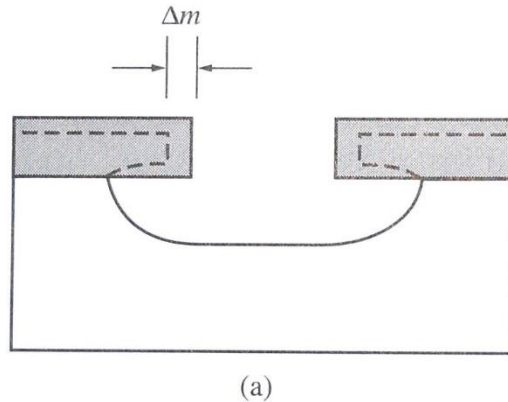


NEDVES MARÁSOK SEBESSÉGÉNEK IRÁNYFÜGGGÉSE

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

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

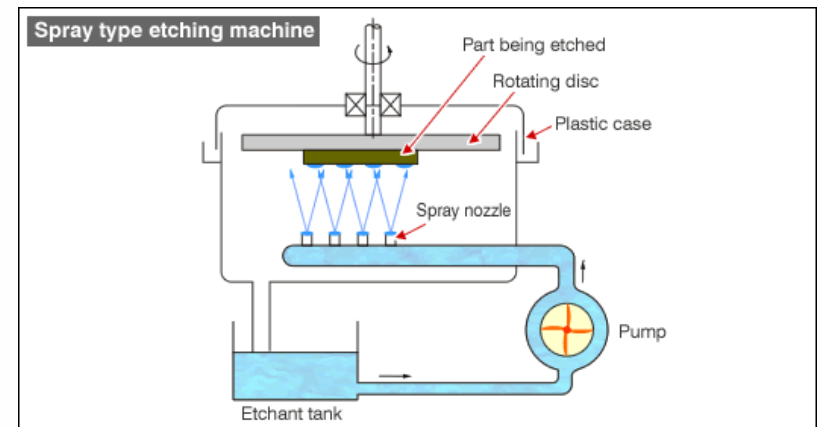
- Hatékony sebességkontrol (paraméterek: porlasztási cseppméret és nyomás)
- Megnövelt marási sebesség a folyamatosan friss marószer miatt
- Kevés szelet

Kemo-mechanikai marás

- Szeletpolírozás (Si szelet vagy polimerek)

Elektrokémiai marás

- Szelektivitás és sebességkontrol (paraméterek: potenciál vagy áram)

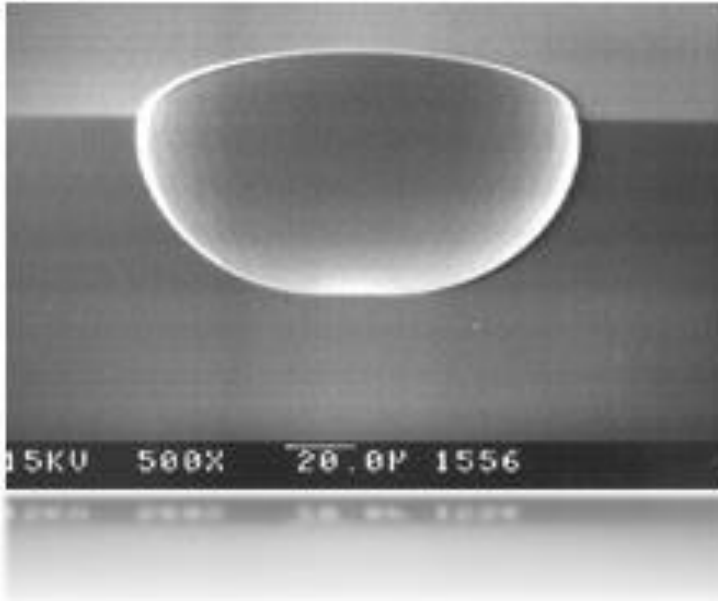


NEDVES MARÁSI RENDSZEREK

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

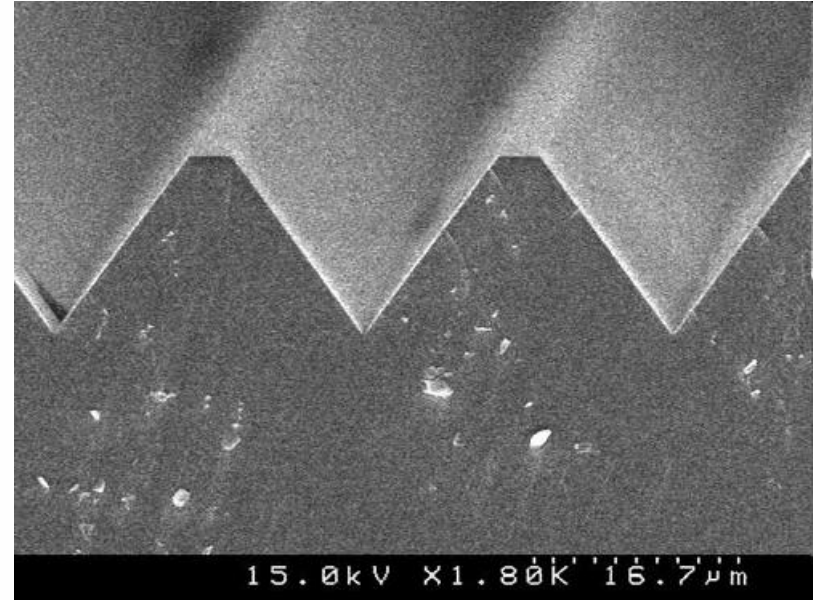
Material	Etchant	Comments
SiO ₂	HF (49% in water) "straight HF" NH ₄ F:HF (6:1) "Buffered HF" or "BOE"	Selective over Si (i.e., will etch Si very slowly in comparison). Etch rate depends on film density, doping. About 1/20 th the etch rate of straight HF. Etch rate depends on film density, doping. Will 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.

SI MARÁS SEBESSÉG IRÁNYFÜGGÉSE



Izotróp: a tér minden irányában egyenletes a marási sebesség

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



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

(pl. lúgos maró – KOH)

SI IZOTRÓP MARÁSA

HF/HNO₃ rendszer marási mechanizmusa

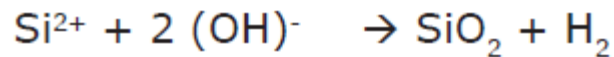
(1) NO₂ képződés



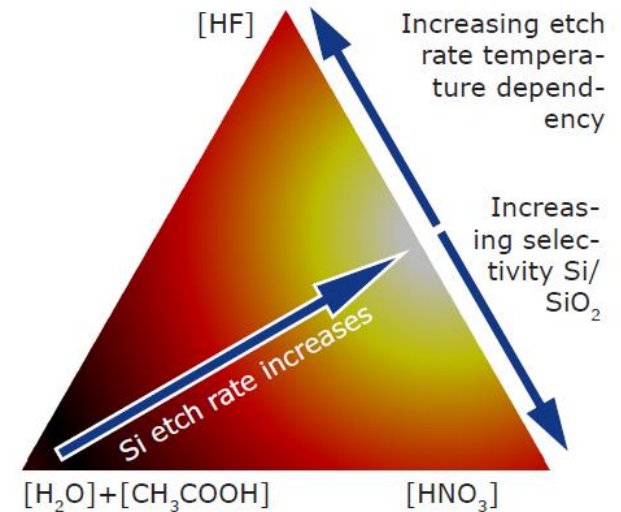
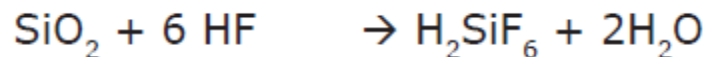
(2) Si oxidációja NO₂ által



(3) SiO₂ képződés



(4) SiO₂ marása

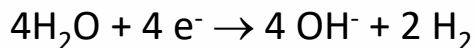


SI ANIZOTRÓP LÚGOS MARÁSA

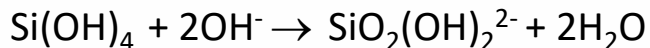
- OXIDÁCIÓ



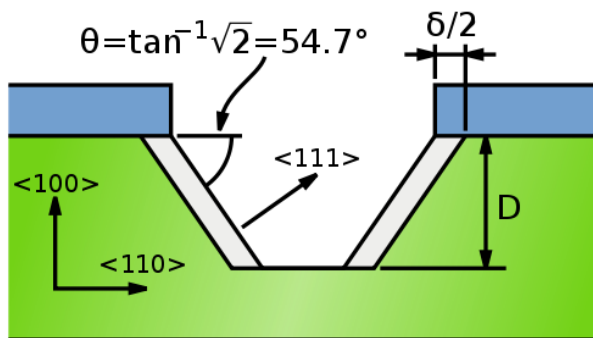
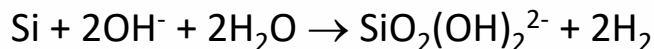
- REDUKCIÓ



- OLDÓDÁS



Bruttó reakció



A marási sebesség függ:

1) Koncentrációtól

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

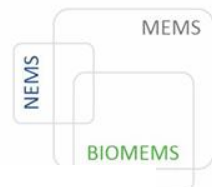
2) Hőmérséklettől

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

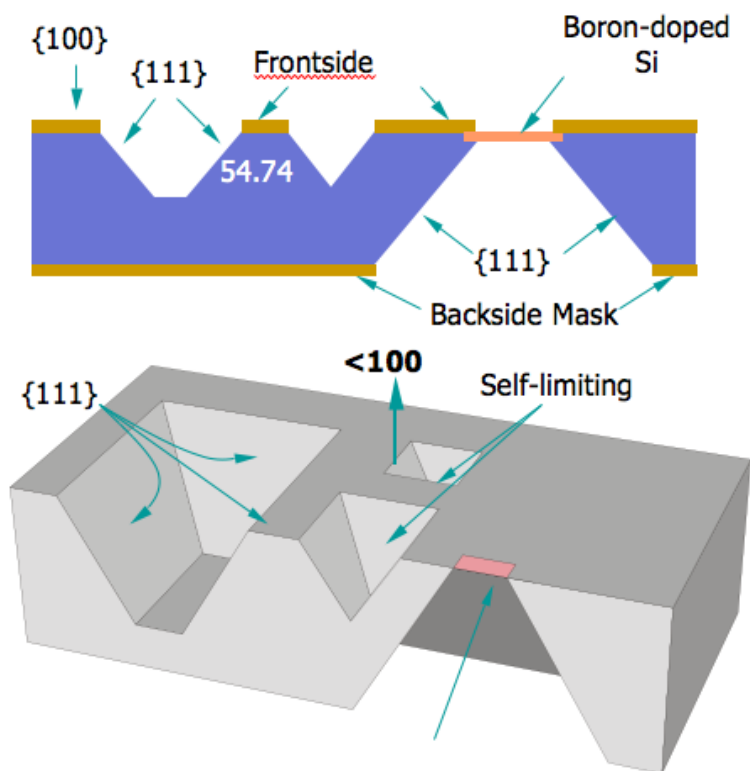
3) Reakciótermékek diffúziójától

Nagy szelektivitás a hordozóra:

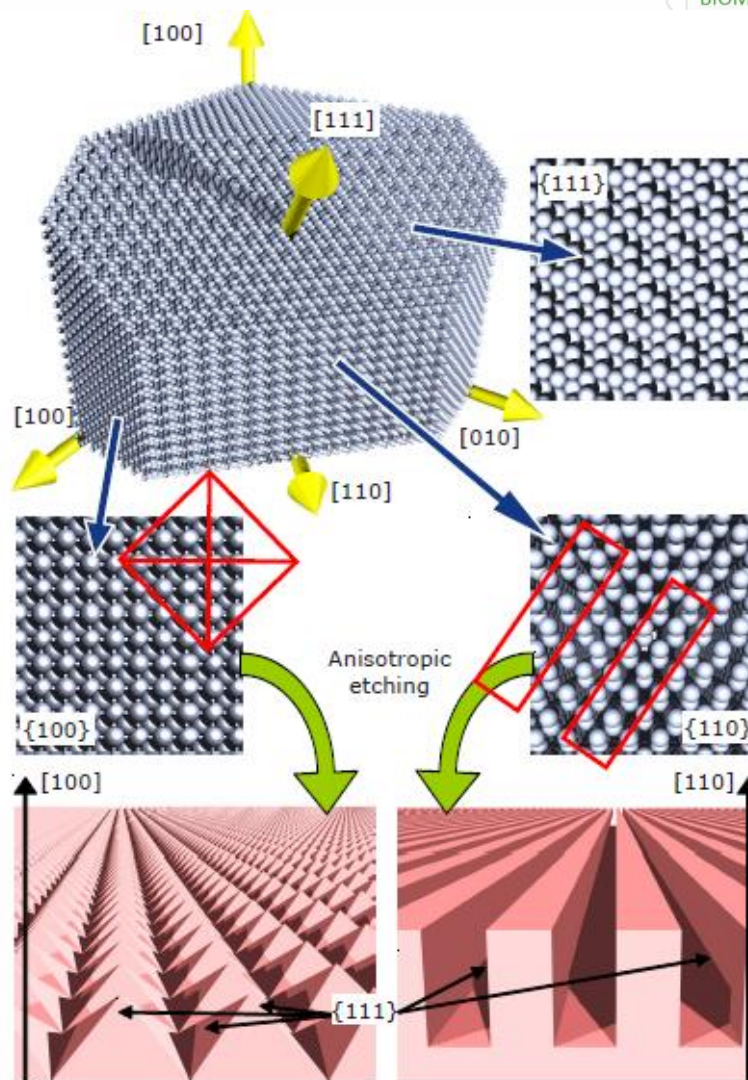
$$S = R_{\langle 100 \rangle} / R_{\langle 111 \rangle} = 300$$



MARÁSI ANIZOTRÓPIA KOH MARÓSZEREBEN



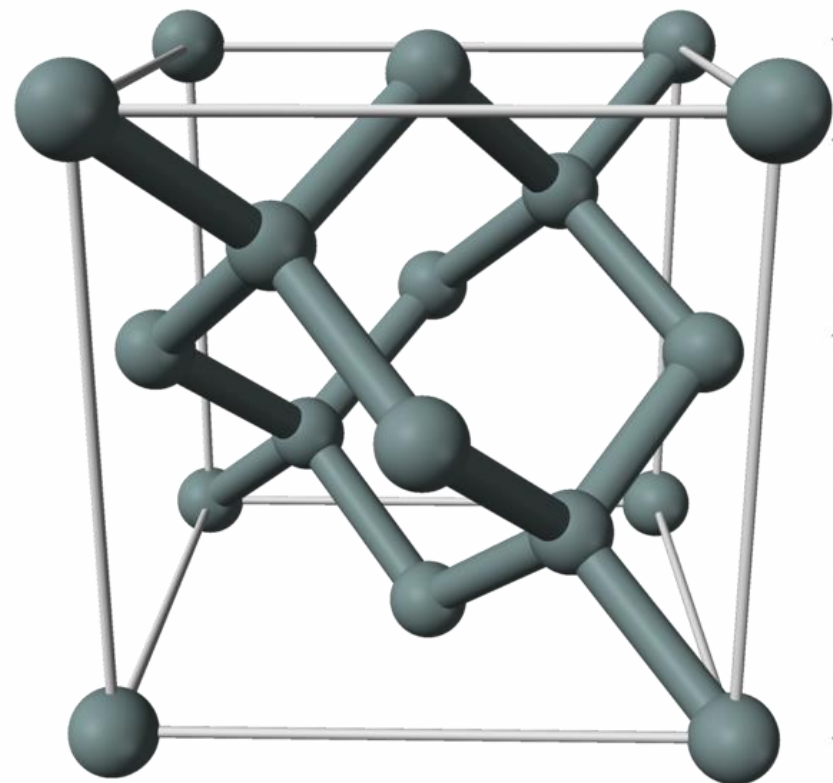
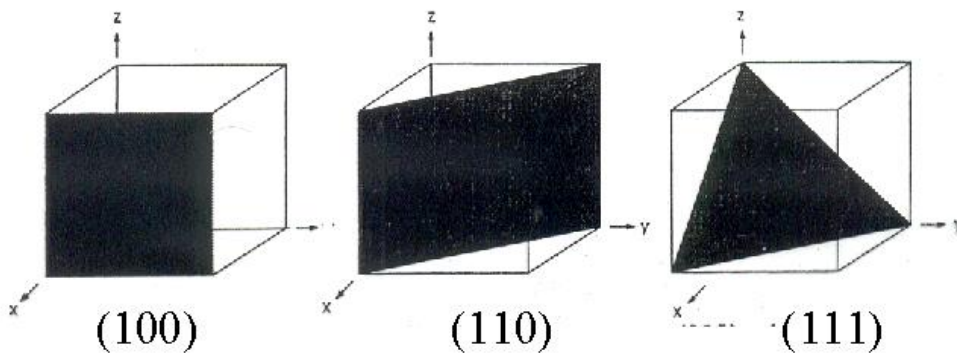
Szelettípus és orientáció is számít!



MARÁSI SEBESSÉG IRÁNYFÜGGÉSE

Szilícium rácsszerkezete: gyémántrács

Legegyszerűbb kristálytani síkok:



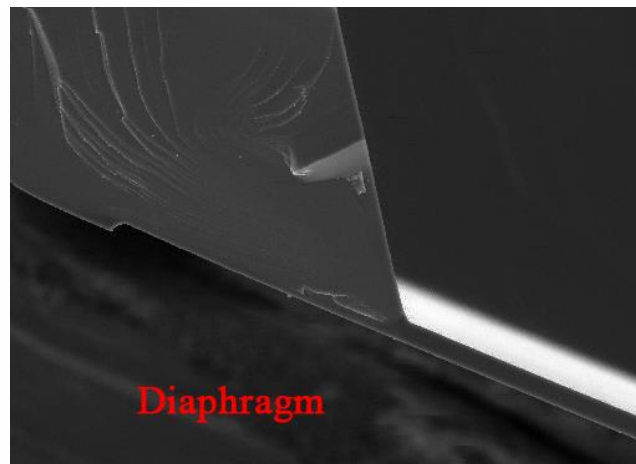
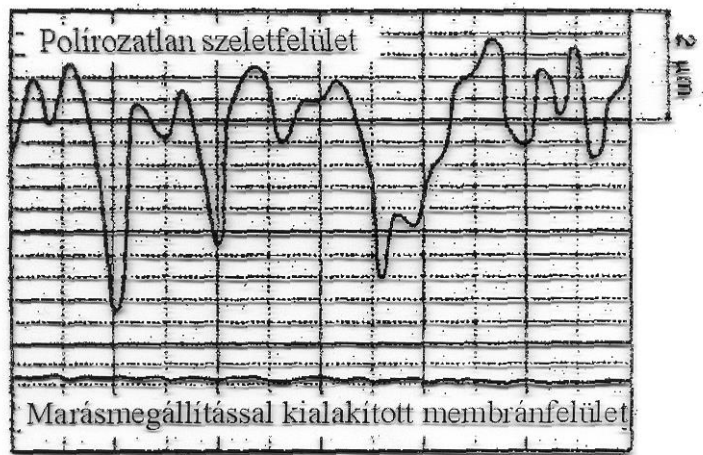
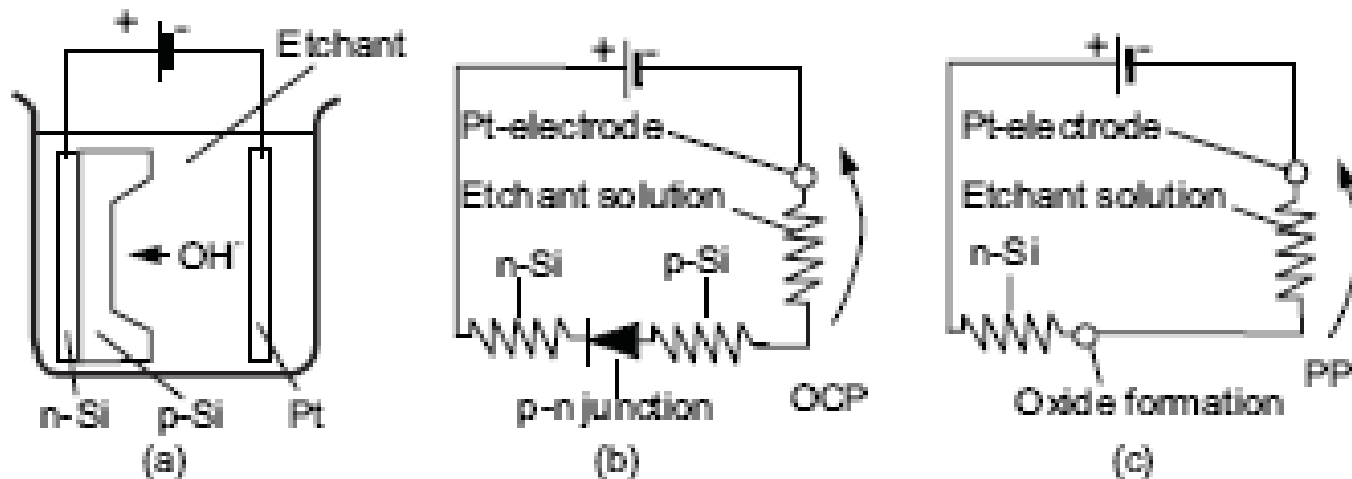
Si-Si kötési energia:

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

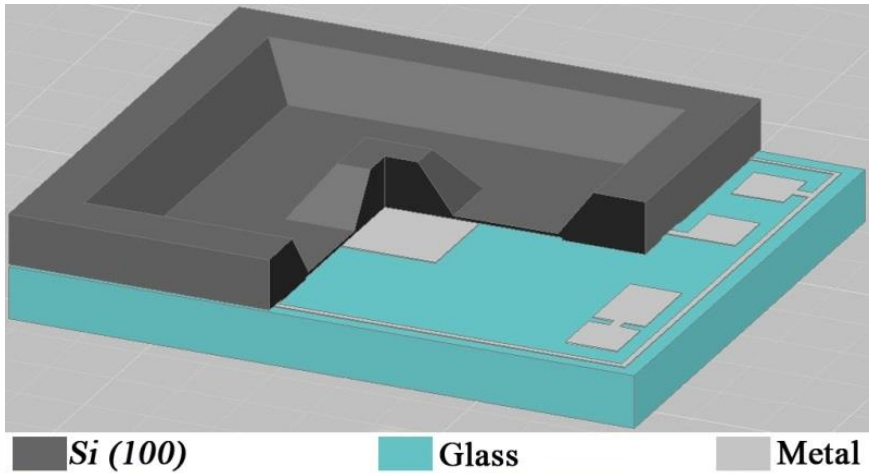
Marási sebesség:

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

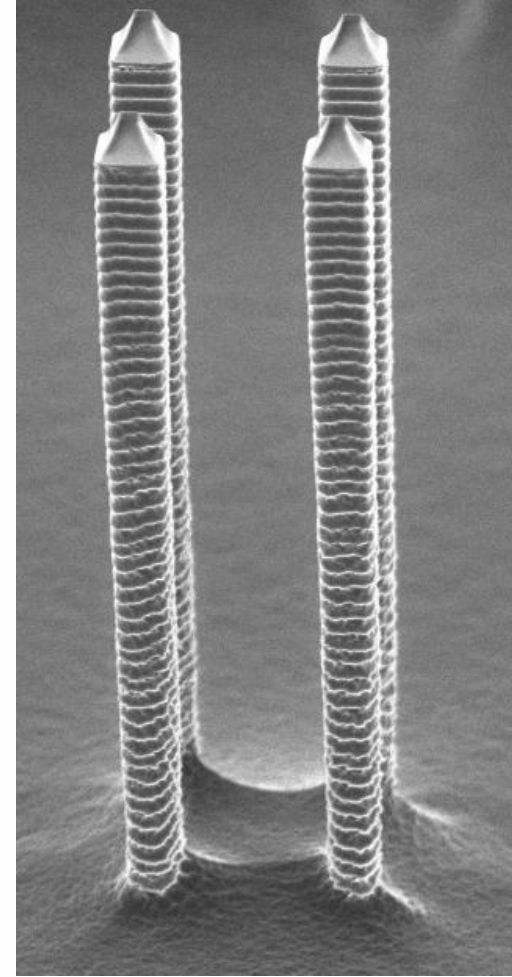
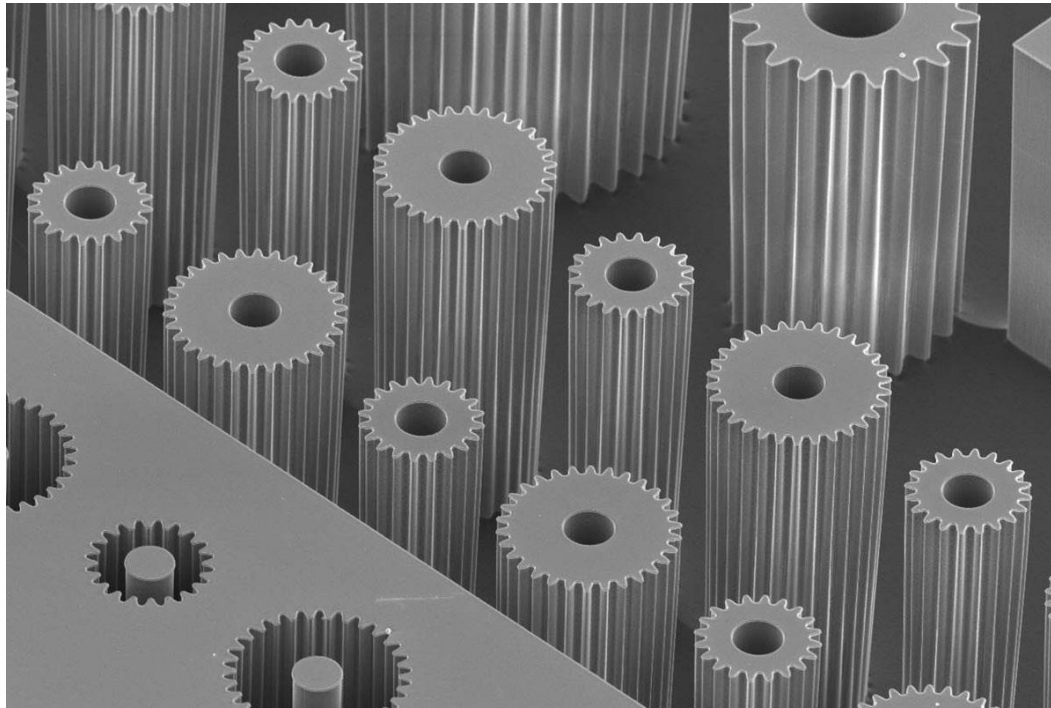
ELEKTROKÉMIAI MARÁSMEGÁLLÍTÁS - ECES



NYOMÁSMÉRŐ SZENZOR



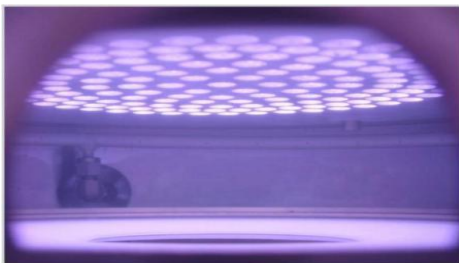
SZÁRAZ MARÁSOK



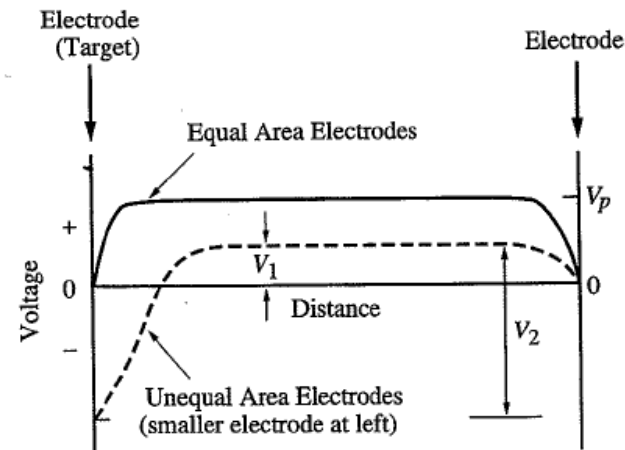
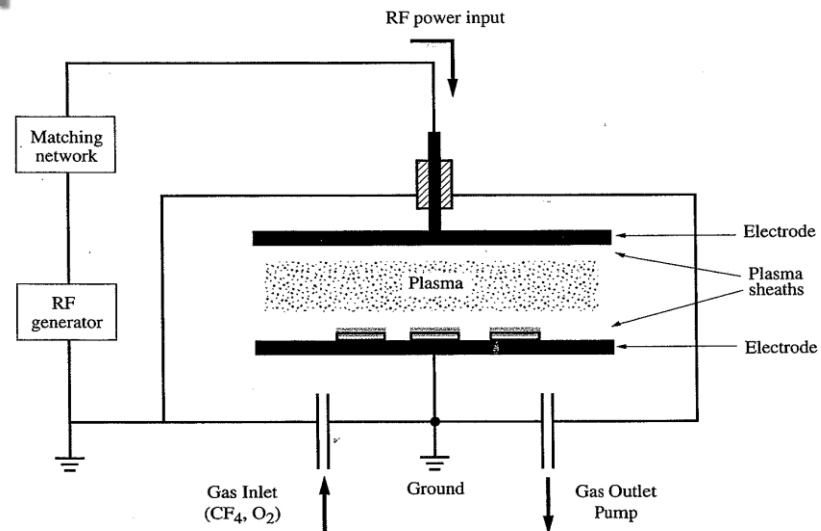
PLAZMA MARÁSOK JELLEMZŐI

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 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)

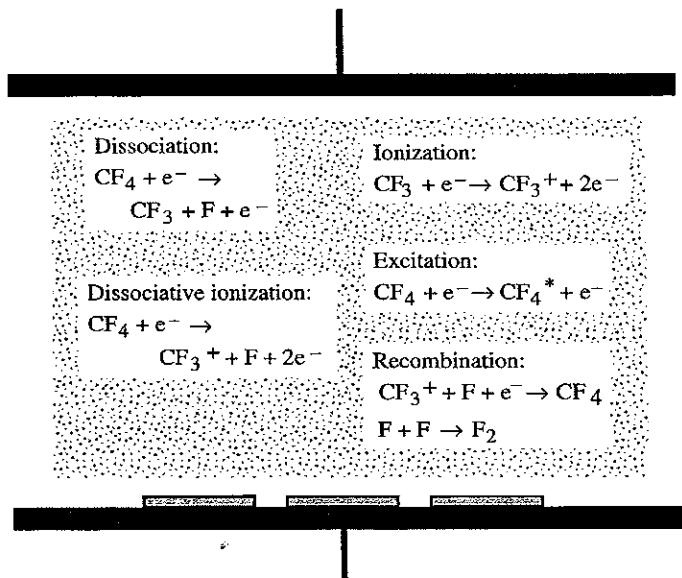


Figure 10-9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

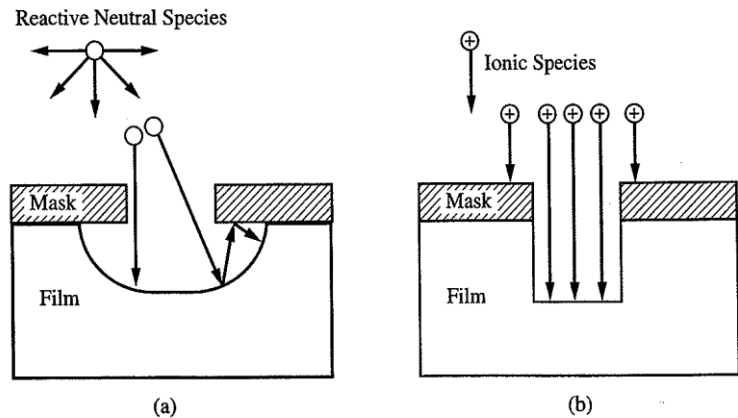
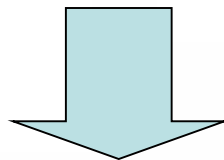
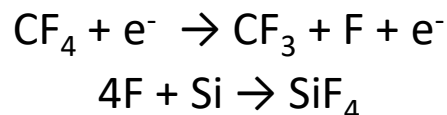


Figure 10-11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient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

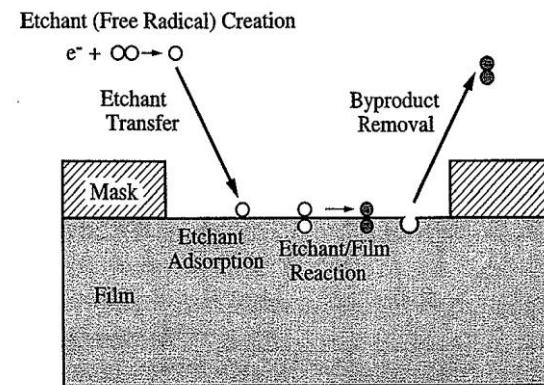


Figure 10-10 Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

Izotróp a marás, mert

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

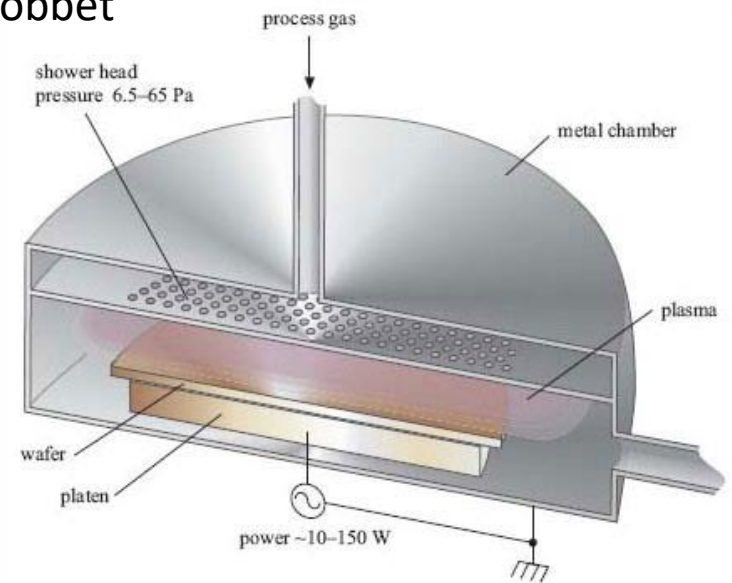
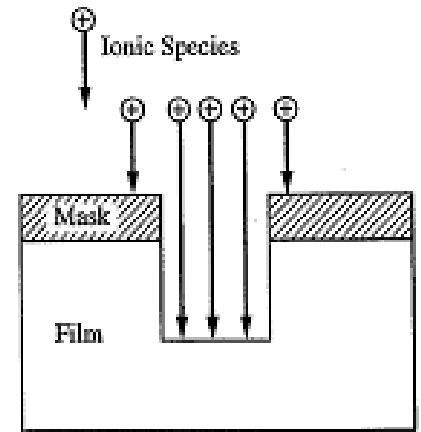
Nagy szelektivitás érhető el

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

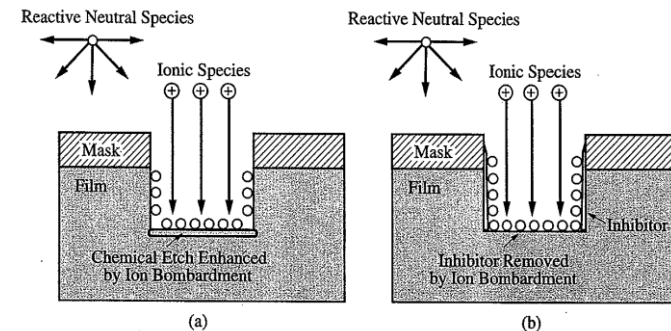
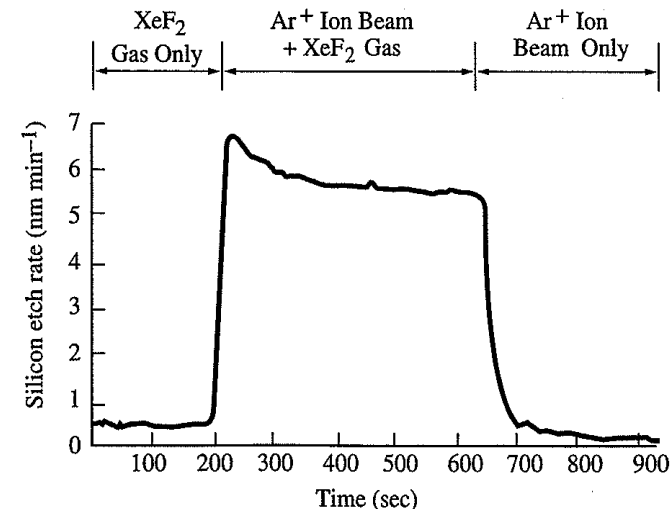


Figure 10-13 Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

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
- Fiziszorpció a felületeken
- Anyagtranszport folyamatok sebességeinek arányai

Hőmérséklet

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

Gázáramlási sebesség / plazma teljesítmény: legyen nagy

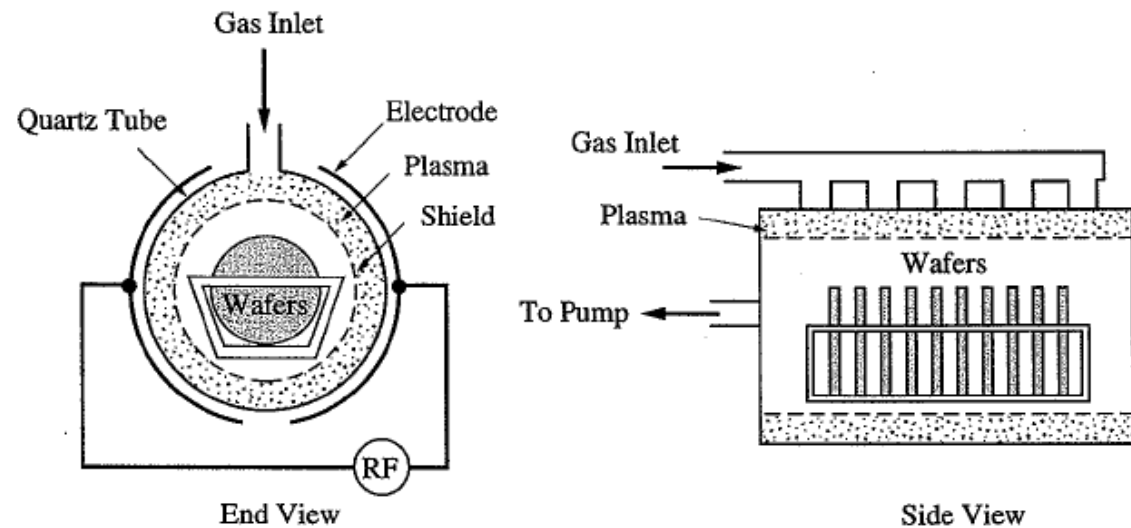
Gerjesztése frekvencia: 13.56 MHz

PLAZMAMARÓ 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)



PLAZMAMARÓ 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

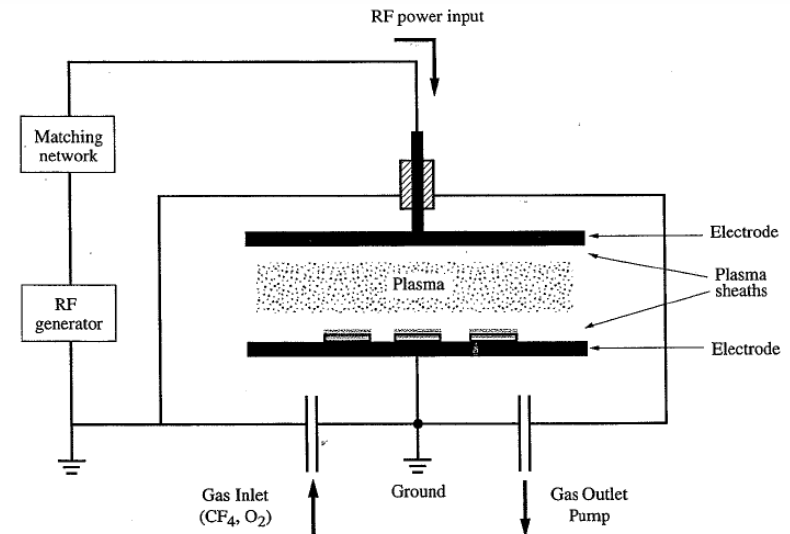


Figure 10-7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

PLAZMAMARÓ BERENDEZÉSEK III.

Sík plazmamaró – RIE (Reactive Ion Etching) mód

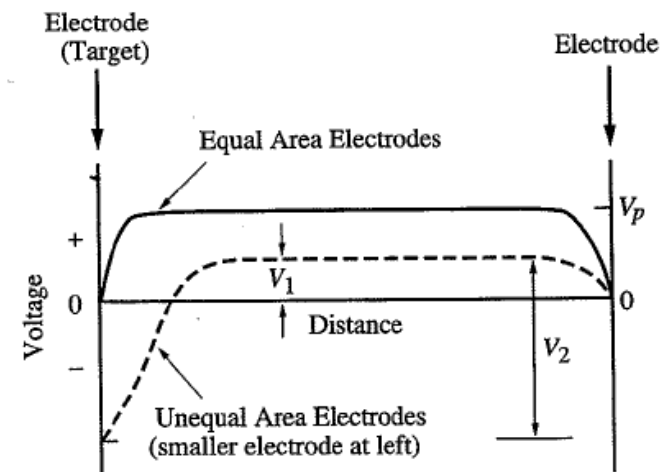
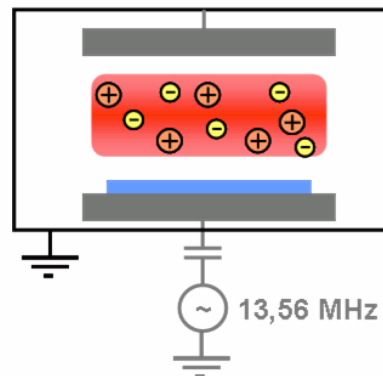
- A szelet a kisebbik elektródán ül, gyakran csak egy szelet
- A nagyobbik a földelt elektróda, csatlakoztatva a kamra falához, jelentősebb a feszültség esés 100-800V tartományban (bias) - ion segített anizotróp marás lehetséges
- kisebb nyomás esetén még irányítottabb a marás, de kisebb a plazma sűrűség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

Példák:

SiO_2 : CHF_3

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

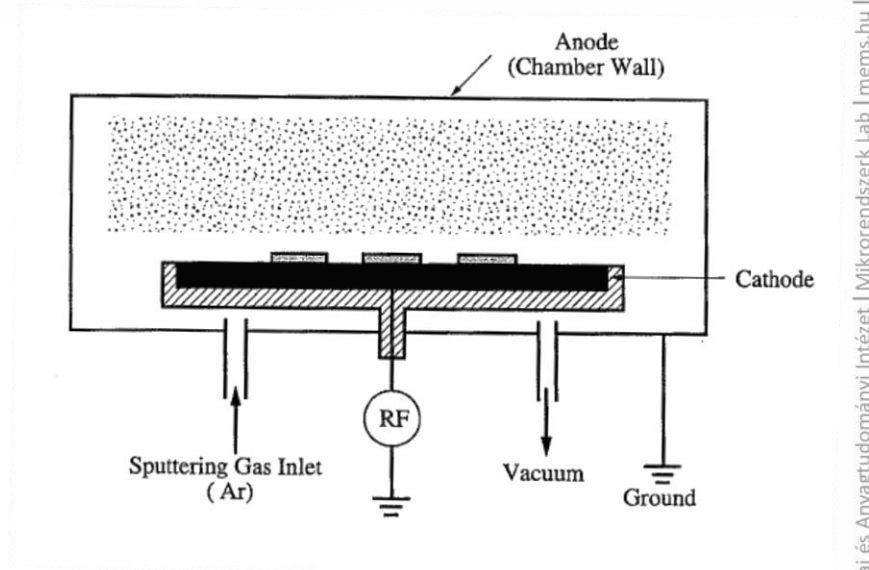
Al: Cl_2 , BCl_3



PLAZMAMARÓ BERENDEZÉSEK IV.

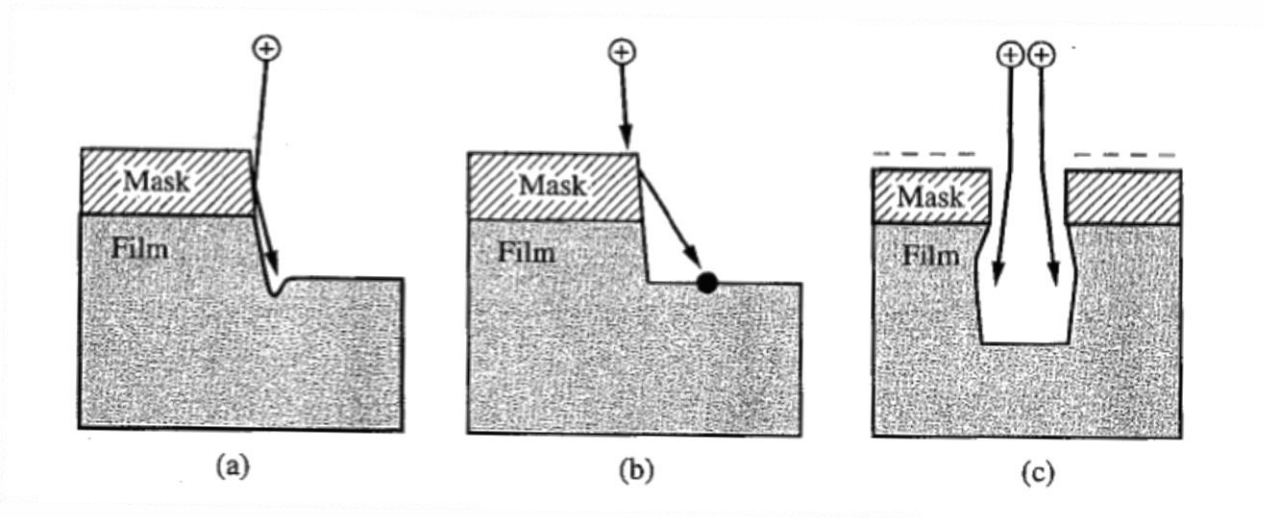
Porlasztás és ion marás (Sputter etching, Ion milling):

- Tisztán fizikai marás
- Kémiaailag 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 IONBOMBÁZÁS 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



PLAZMAMARÓ BERENDEZÉSEK V. HDPE - High Density Plasma Etching



PLAZMAMARÓ BERENDEZÉSEK V. HDPE - High Density Plasma Etching

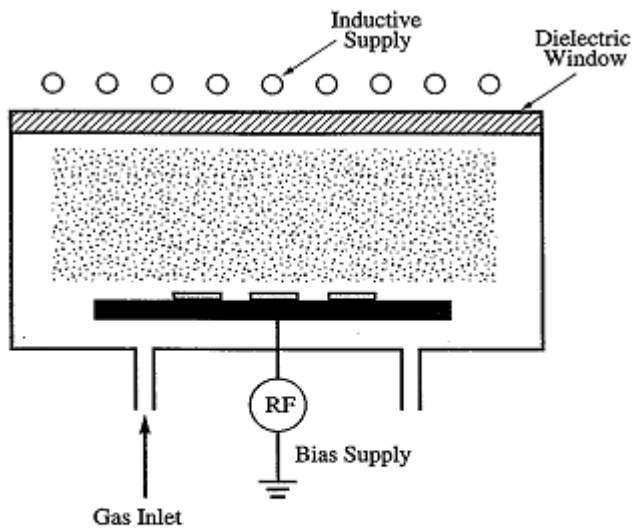


Figure 10-16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **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

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

$SF_6 + O_2 @ cryo \text{ } ^\circ C$

Pulsed mode DRIE / Bosch

$SF_6 + C_4F_8 @ RT$

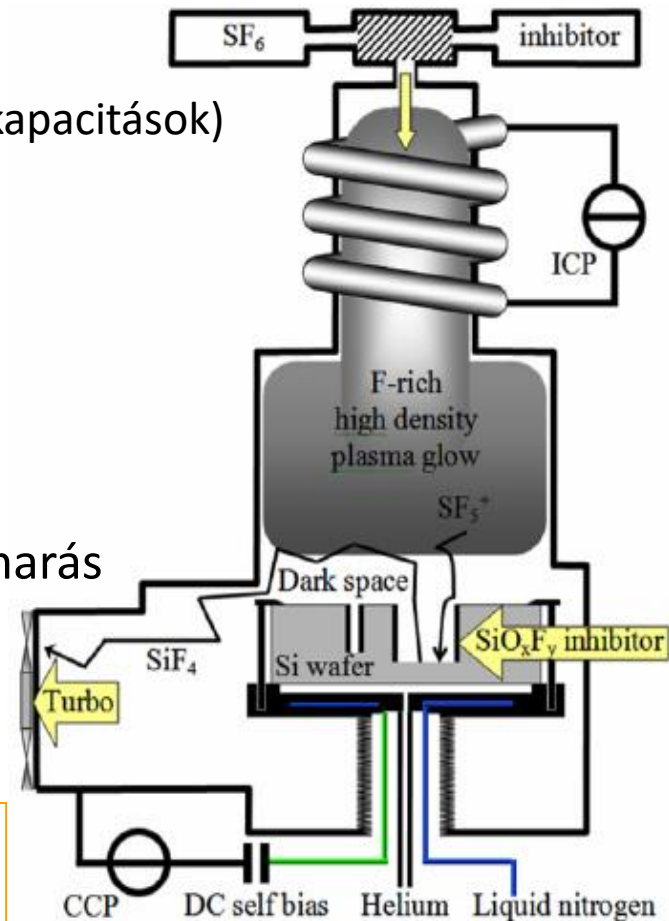
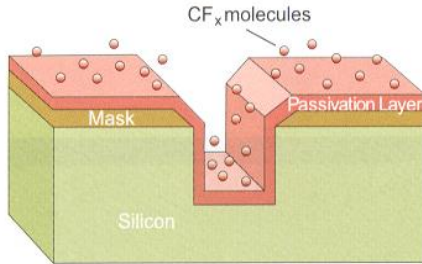
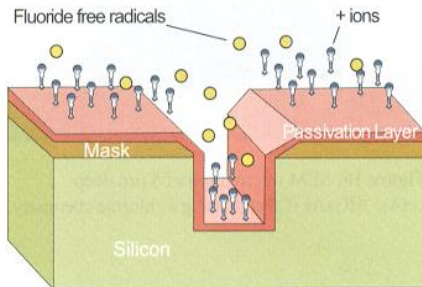
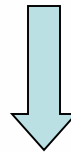


Figure 1. A dual source DRIE system.

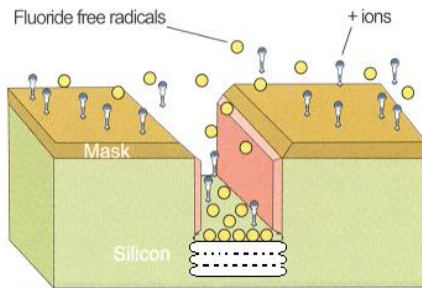
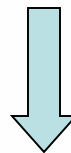
DRIE – BOSCH PROCESS



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



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



- SF_6 izotróp - enyhén anizotróp Si marás



DRIE CRIO vs. BOSCH

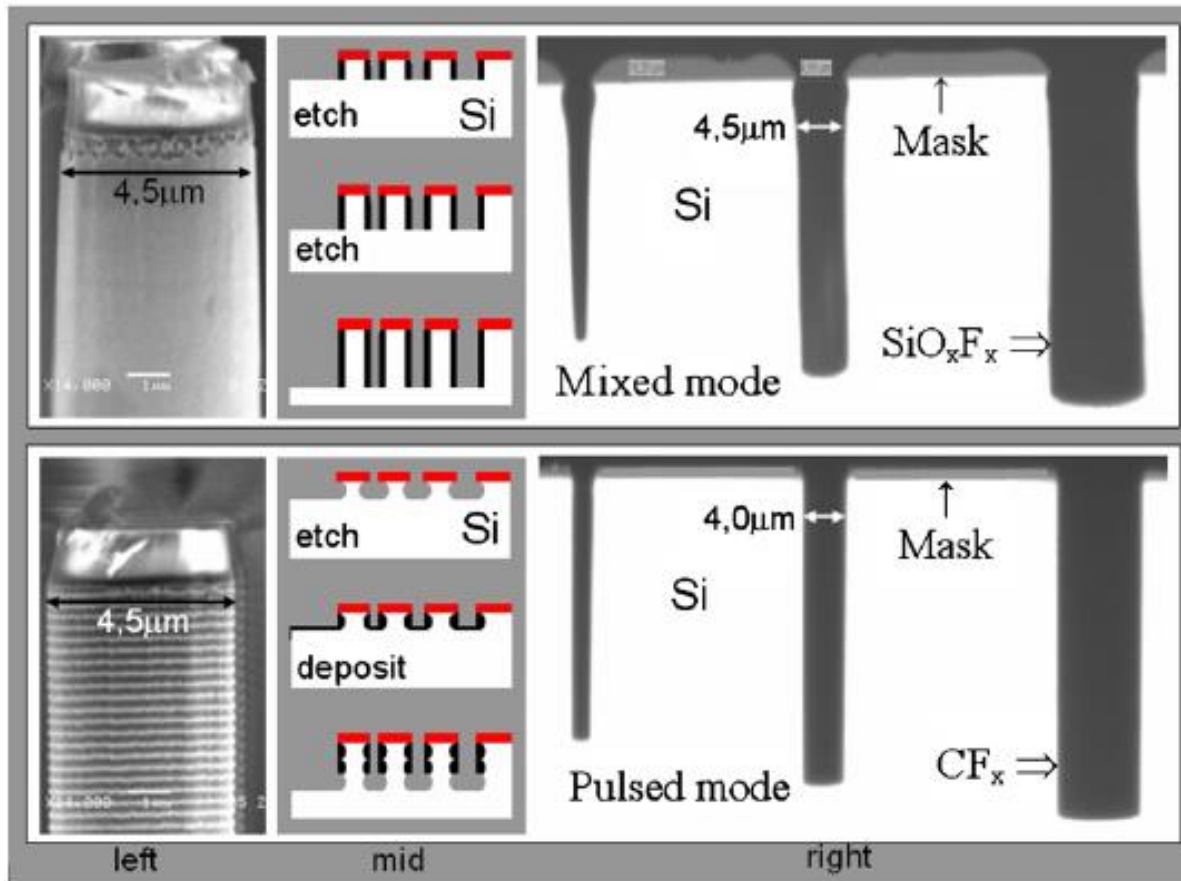


Figure 3. Cross-sectional views of trenches etched in mixed-mode versus pulsed-mode DRIE.

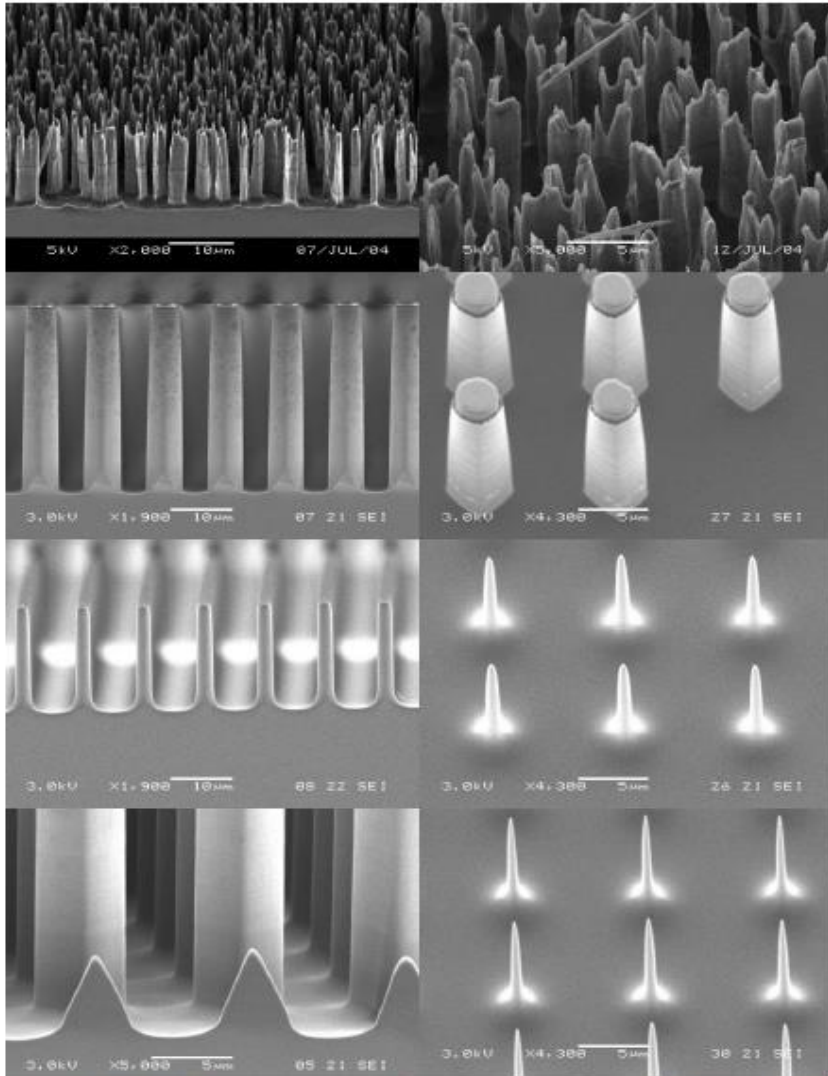


Figure 19. (Top) Black silicon and (rest) optimized result for cryogenic temperature mixed-mode DRIE (see figure 27).

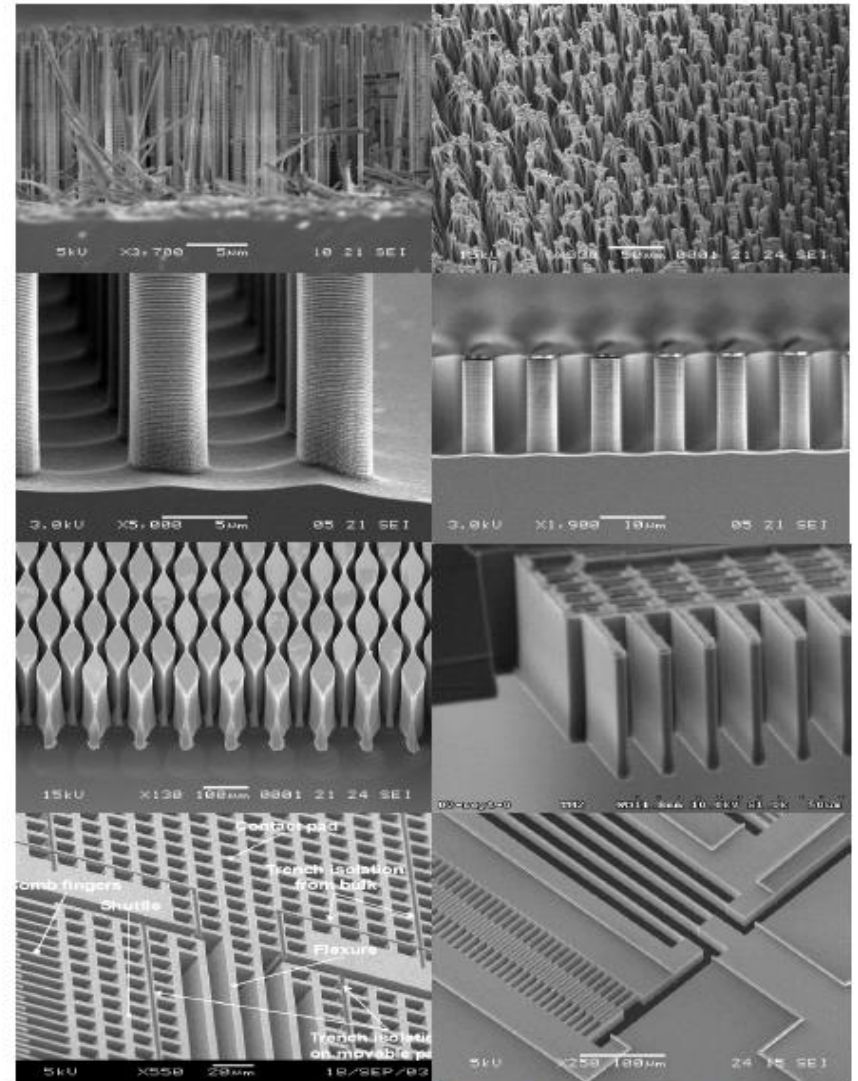
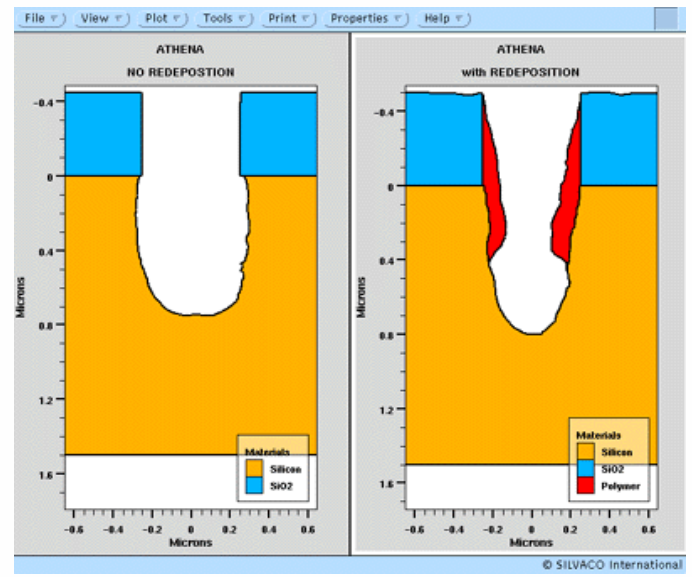
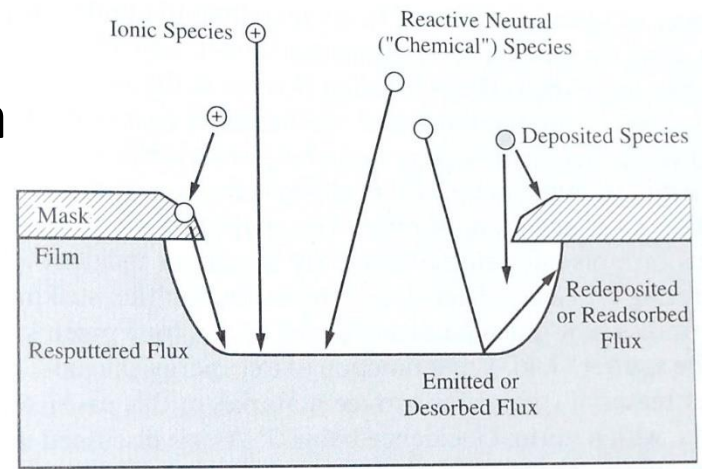
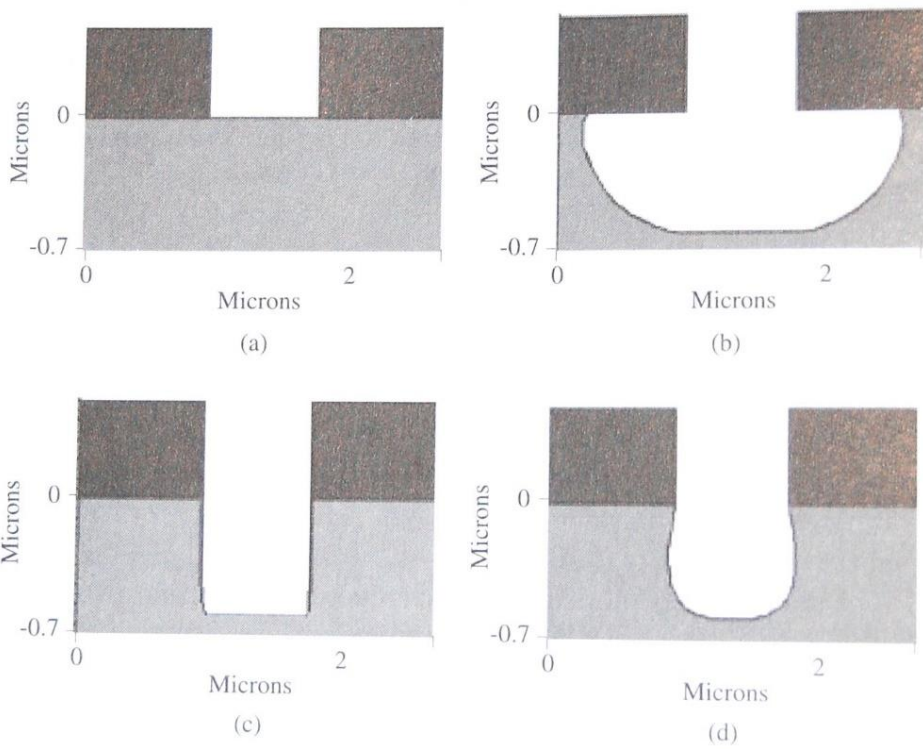


Figure 27. Typical result for room temperature pulsed-mode DRIE (see figure 19).

TECHNOLÓGIA MODELLEZÉS

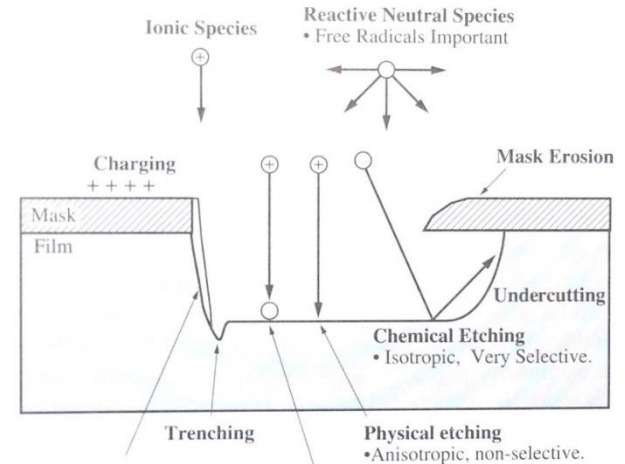
Topográfia modell – pl. Silvaco Athena



PLAZMA MARÁS - ÖSSZEGRZÉS

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 . 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.
Si ₃ N ₄	CF ₄ /H ₂ , CHF ₃ /O ₂ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈	Very anisotropic; selective over Si.
	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.
Al	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 .
	Cl ₂	Near isotropic (significant undercutting).
W	Cl ₂ /CHCl ₃ , Cl ₂ /N ₂	Very anisotropic; BCl ₃ often added to scavenge oxygen.
	CF ₄ , SF ₆	High etch rate; nonselective over SiO ₂ .
Ti	Cl ₂	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



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.

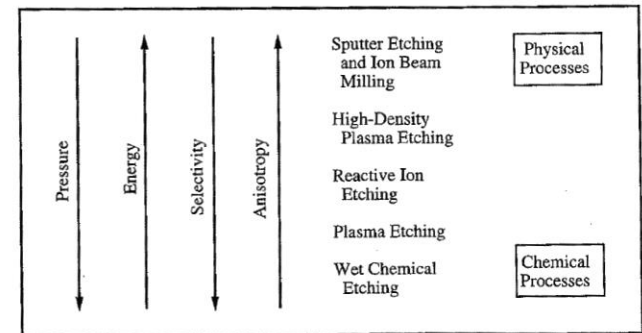
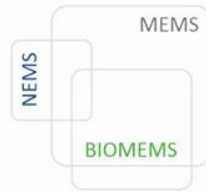
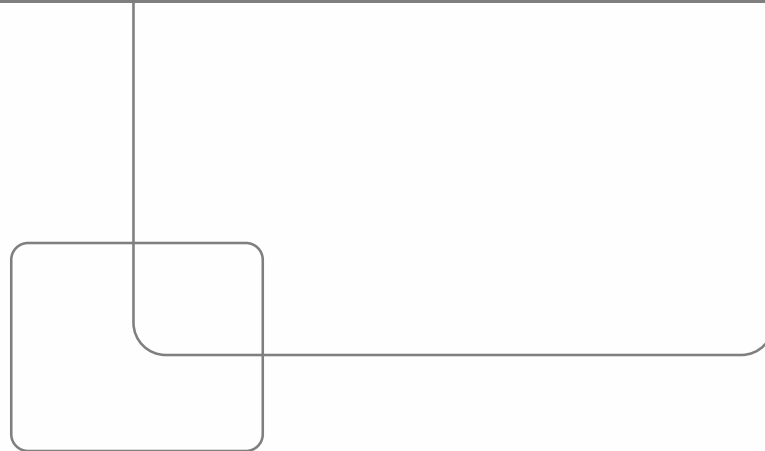


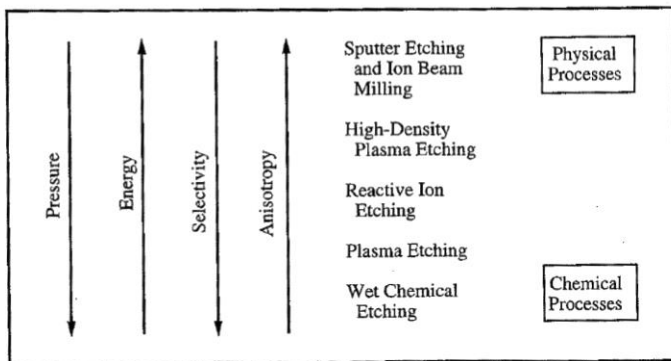
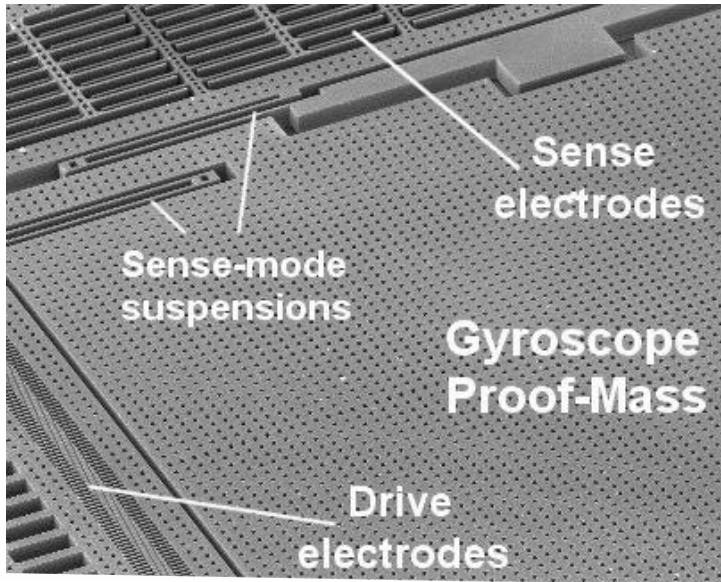
Figure 10-19 Summary of trends of different etch systems.



MARÁSOK - ÖSSZEGZÉS

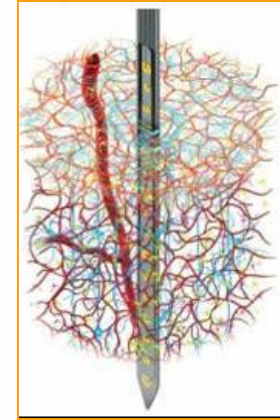
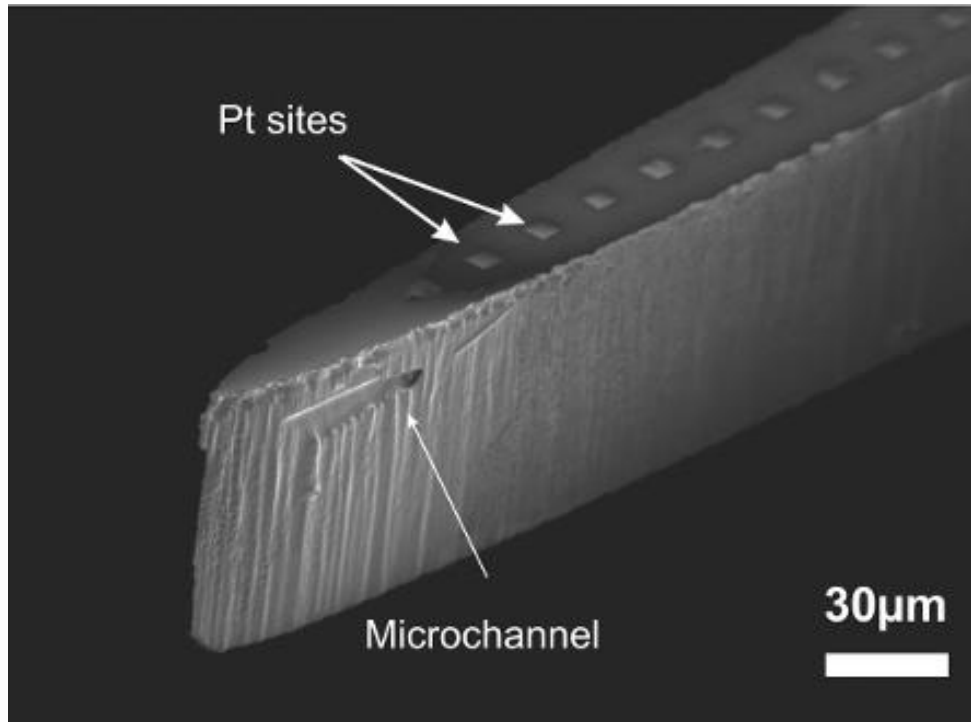


MARÁSOK - ÖSSZEGRZÉS



- | NEDVES MARÁS: | SZÁRAZ MARÁS: |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Kémiai marószer Atmoszféra, kád | <ul style="list-style-type: none"> Plazma: reaktív ionok Vákuum kamra |
| <ul style="list-style-type: none"> Alacsony költség Egyszerű kivitelezés | <ul style="list-style-type: none"> Drága és komplikált a kivitelezése Toxikus és korrozív gázok Automatizálható |
| <ul style="list-style-type: none"> Kiváló szelektivitás 1µm felbontás alatt nem alkalmazható Nehéz állandó marási sebességet biztosítani Szennyeződés | <ul style="list-style-type: none"> Rossz szelektivitás Mély marás 100nm alatti tartományban Magas marási sebesség |
| <ul style="list-style-type: none"> Izotróp marás (kivéve kristályos anyagok esetén) | <ul style="list-style-type: none"> Izotróp / Anizotróp |

ELTEMETETT GYÓGYSZERADAGOLÓ CSATORNA SZILÍCIUM NEURÁLIS ELEKTRÓDÁBAN



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

ELTEMETETT MIKROCSATORNA TECHNOLÓGIÁJA

