

MEMS technológia

Illeszkednie kell a CMOS technológiához - főleg Si egykristály alapú

Fajtái:

Felületi mikromegmunkálás

Tömbi mikromegmunkálás

LIGA

Meleg dombornyomás

Egykristályos szilícium

- legtisztább anyag
- legtökéletesebb egykristály
- IC gyártás fő alapanyaga (még egy évtizedig biztosan)
- Si alapú fotonika ?

Fontosabb adatok:

| | |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| kristályszerkezet: | fcc |
| rendszám: | 14 |
| atomtömeg: | 28.09 |
| tömegsűrűség: | 2.328 g/cm³ |
| atomsűrűség: | 5*10²² cm⁻³ |
| relatív diel. állandó: | 11,7 |
| hővezetés: | 1,48 W/cmK |
| adalekolás: | p- vagy n-típusú |
| erős adalekoltság (p ⁺ , n ⁺): | N_{d,a}>10¹⁷ cm⁻³ (~0.1 Ωcm) |
| fajlagos ellenállás: | 10 kΩcm – 1 mΩcm |
| szeletátmérő: | 300 mm (Intel), 75-100 mm (MFA) |

Si 3D megmunkálása (Si micromachining)

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

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

Mikromechanika:

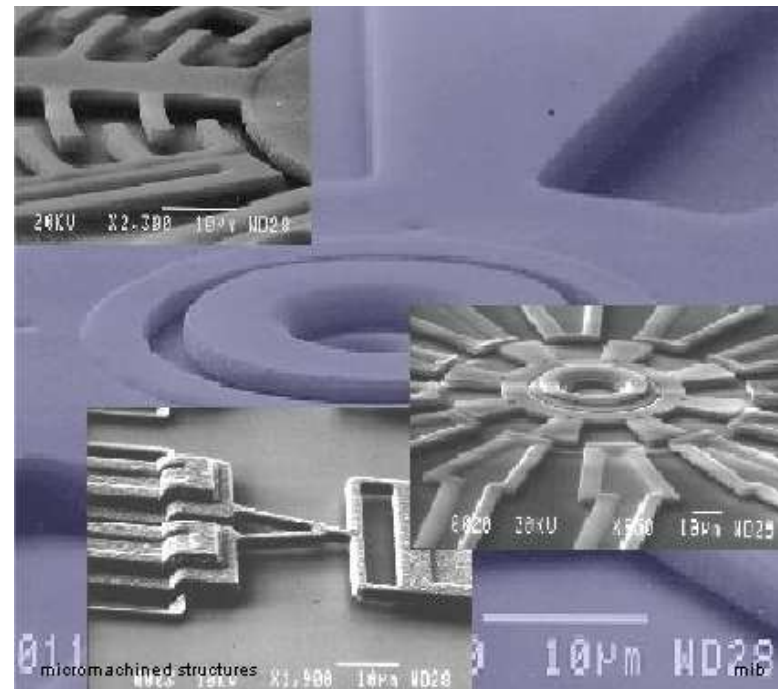
- eljárások és eszközök: döntő többségében eltérnek a hagyományos mechanikai megmunkálásoktól
- elsősorban „száraz” ill. „nedves” kémiai marások és elektrokémiai módszerek
- de klasszikus eljárások is lehetnek (laser, v. gyémánttárcsás vágás)

Jellemző méretek: 1-500 μ m

Si kristály vastagsága: 380-500-1000 μ m

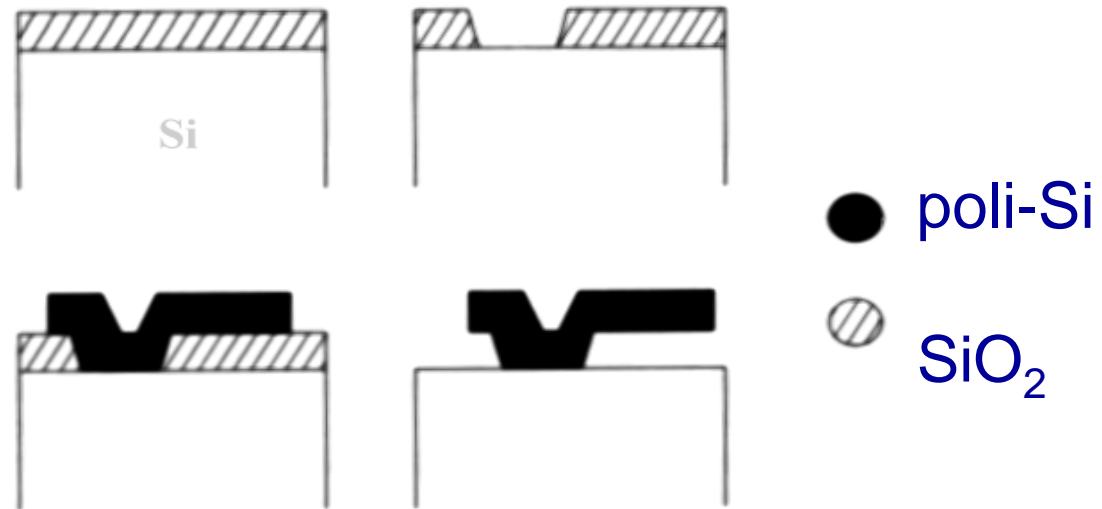
Felületi mikromegmunkálás (surface micromachining)

- Hordozó felületére leválasztott rétegek megmunkálása szelektív marással
- Mikromechanikai elemek integrálhatóak mikroelektronikai elemekkel (SystemOnChip)
- A már elkészült integrált áramkör felületén



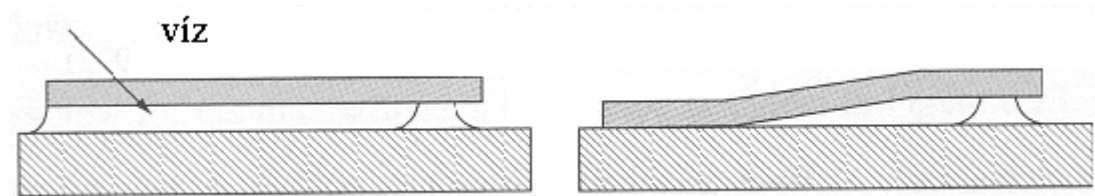
Felületi mikromegmunkálás

Rezgőnyelv kialakítása

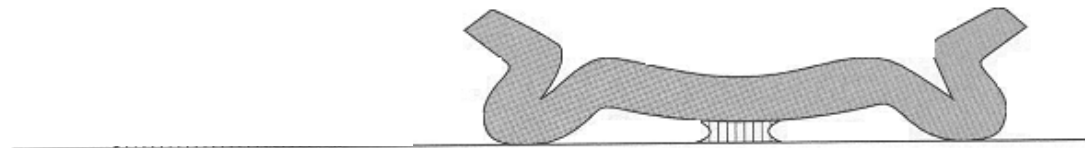


Rétegleválasztási és szelektív marási lépések megfelelő sorrendű alkalmazása.

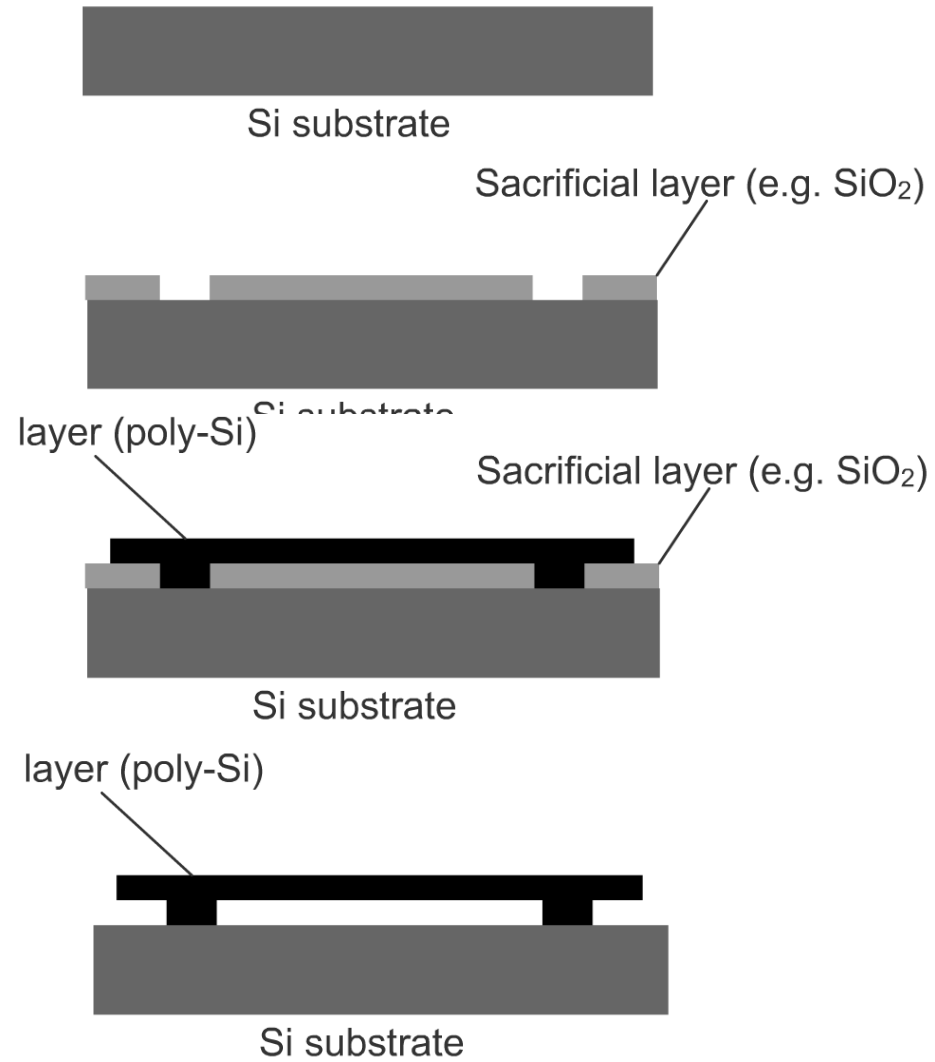
Jellegzetes hiba: letapadás



Megoldás: beépített ütköző, v. perforált alakzatok, v. száraz marások



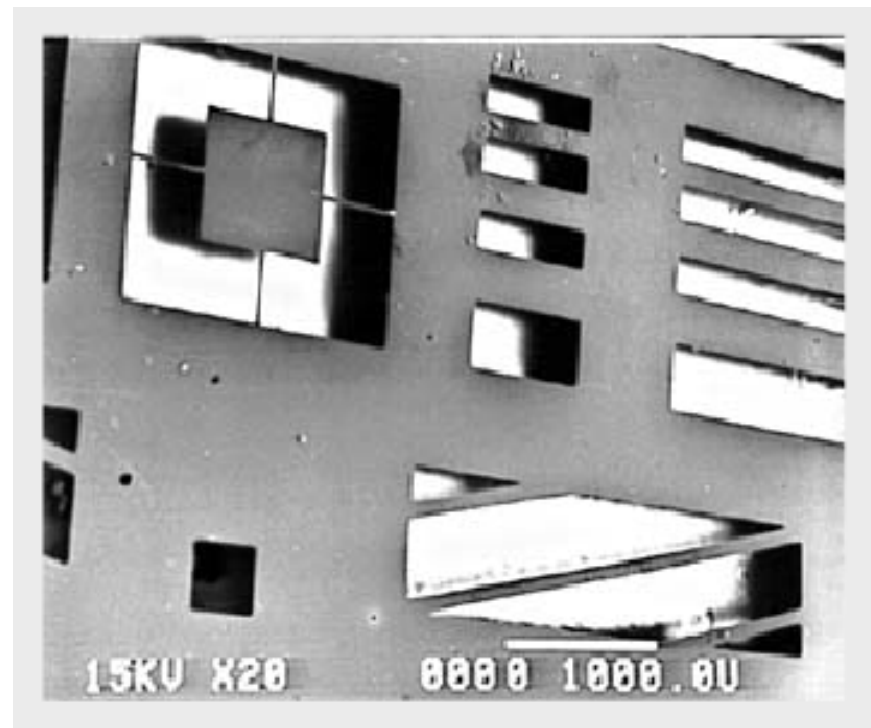
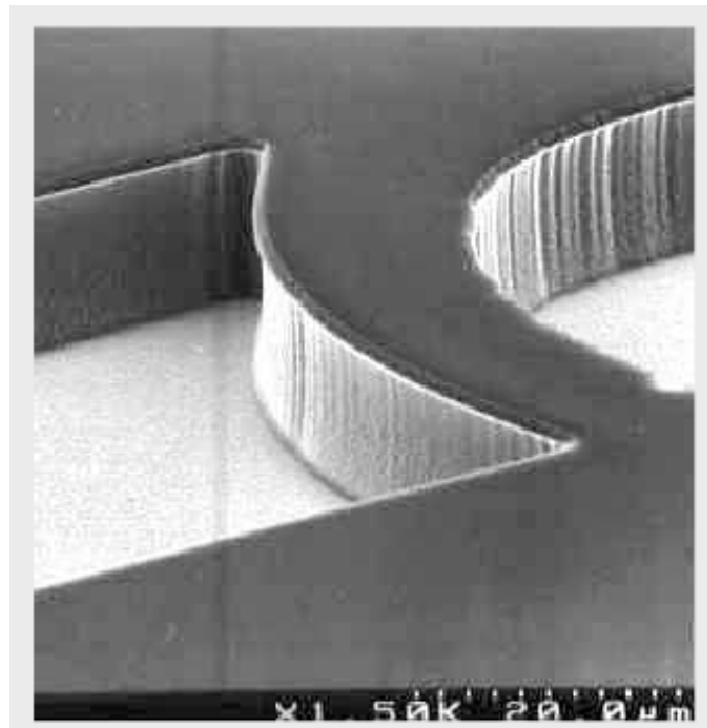
Membrán kialakítása



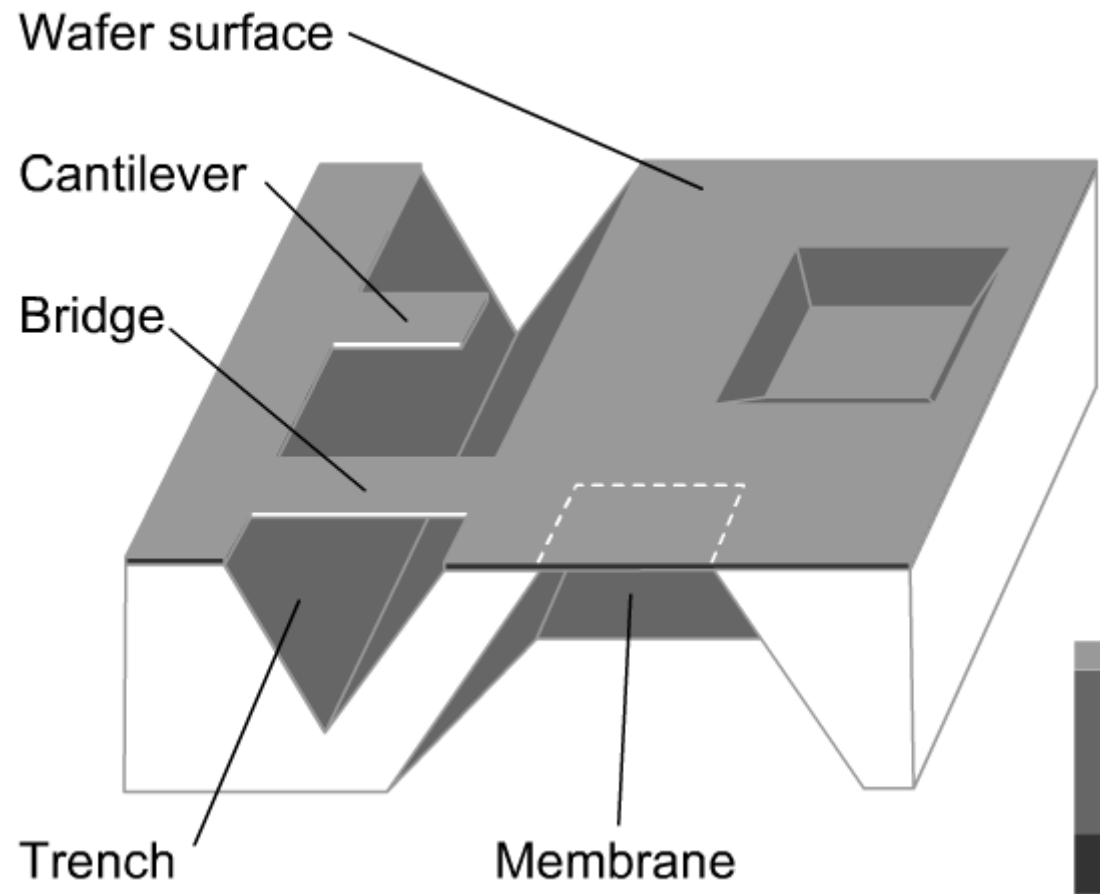
Tömbi mikromegmunkálás (bulk micromachining)

Egykristályos vagy amorf hordozók megmunkálása

- Marási technológiák fejlődése tette lehetővé használatát
- Nagyon vékony mechanikai elemek - membránok - állíthatóak elő
- Kétoldalas litográfia szükséges



Tipikus alakzatok



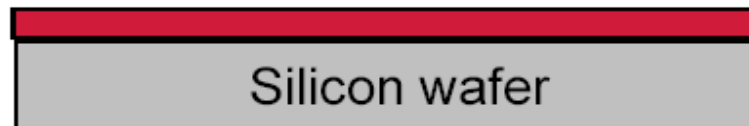
Tömbi mikromegmunkálás

A szilícium alapú mikroszerkezetek és érzékelők tömbi kialakításának alapját a szilícium anizotropikus maratása jelenti: bizonyos kémiai maratószerrek (pl. KOH) az (100) és (110) orientációjú síkokat lényegesen gyorsabban marják, mint az (111) síkokat. Ez teszi lehetővé, hogy az (100) felületi orientációjú szilícium szeletbe különféle, határozott geometriával rendelkező alakzatok marhatók. A szeletet először oxidálják, majd az oxidba ablakot nyitnak fotolitográfia és maratás útján. A szilícium kimarható azon részeken ahol az oxidréteg nem maszkolt. Anizotrópikus maratószer esetén a felületre merőlegesen – (100) irányban- a maratás gyors, míg oldalirányban - az (111) irányban - pedig lassú. Így a maszk jellegétől függően "V" keresztmetszetű árok illetve fordított gúla alakú bemarások alakíthatók ki.

A maratás felületre merőleges irányban lelassítható lassan maródó, ún. "etch-stop" réteg beépítésével, amely lehet pl. egy erősen adalékolt p réteg.

Felületi és tömbi mikromegmunkálás - összehasonlítás

Deposit or grow silicon dioxide



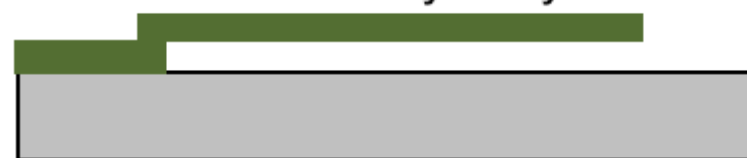
Pattern the oxide using a mask
Deposit polysilicon



Pattern polysilicon



Sacrifice oxide layer by dissolving



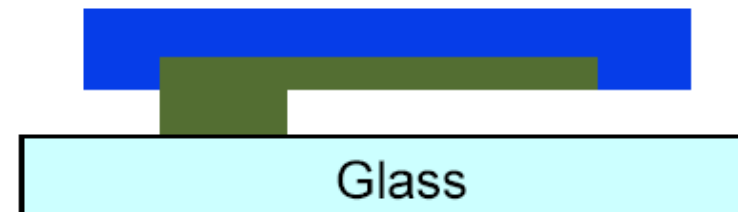
Etch using a mask



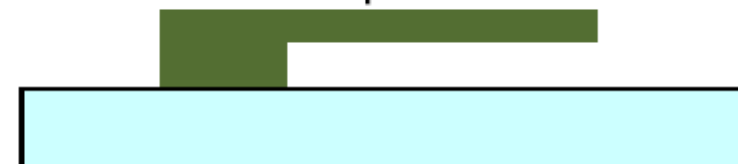
Boron doping using a mask



Flip and bond to a glass



Dissolve undoped silicon



Nedves kémiai marások

A marószerekkel 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)

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 |

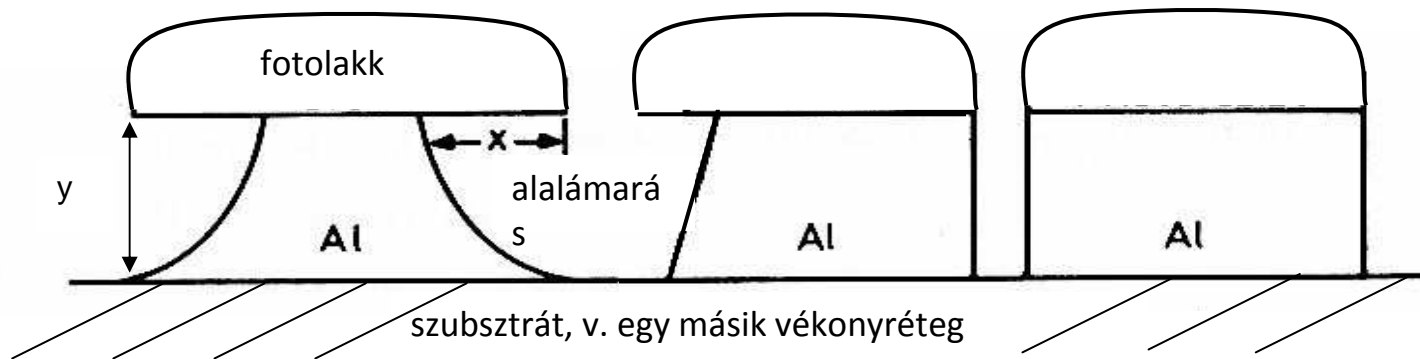
| Etchant | Etch rate ratio | | Etch rate (absolute) | | |
|---------------------------|-----------------|-------------|----------------------|--------------------------------|------------------|
| | (100)/(111) | (110)/(111) | (100) | Si ₃ N ₄ | SiO ₂ |
| KOH (44%, 85°C) | 300 | 600 | 1.4 μm/min | 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

Anizotrópia foka

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

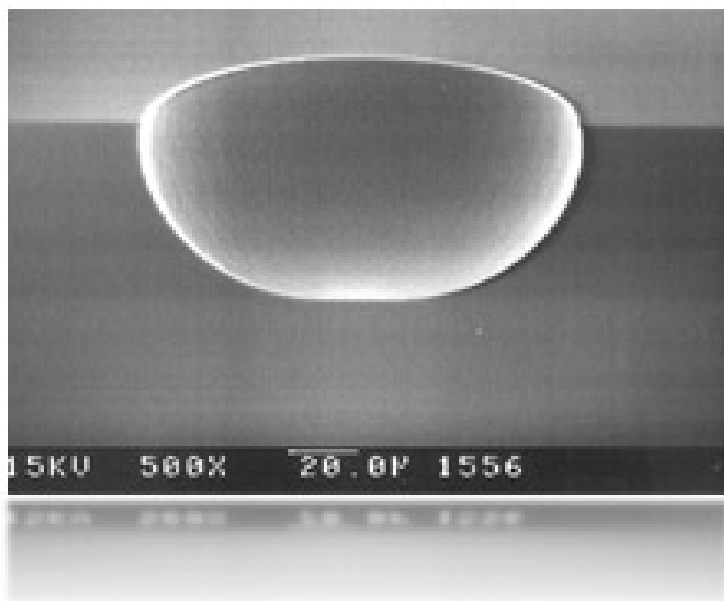
Izotróp $\rightarrow x = y$

Anizotróp $\rightarrow x \ll y$

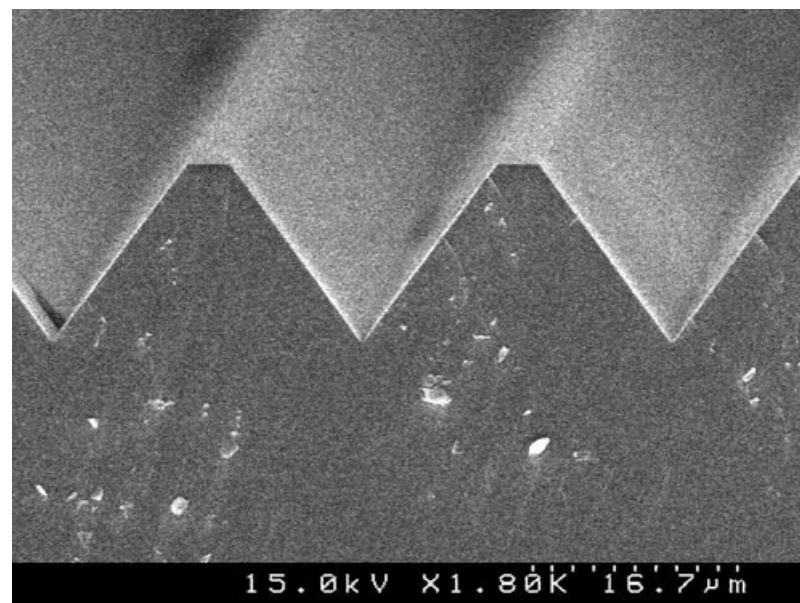


- Izotróp marási eljárások:
HF/HNO₃ rendszer (poli-maró), pórusos Si marás
- Anizotróp marási eljárások:
Lúgos marószerek (KOH, NaOH, EDP, TMAH stb.)
- Átmeneti eljárások: plazmás marások (pl. RIE)

Izotróp / Anizotróp marási profil



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

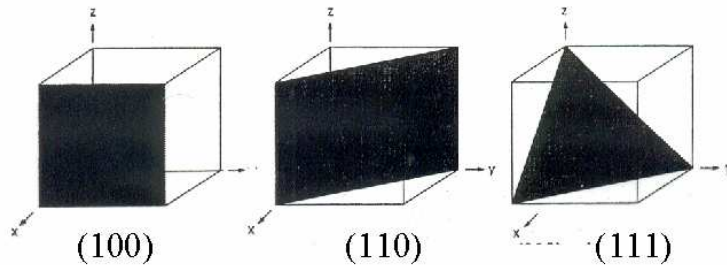


Anizotróp: a különböző kristálytani irányokban más és más a marási sebesség (pl. lúgos maró – KOH)

Marási sebesség irányfüggése

Si - gyémántrács (lapcentrált köbös)

Legegyszerűbb kristálytani síkok

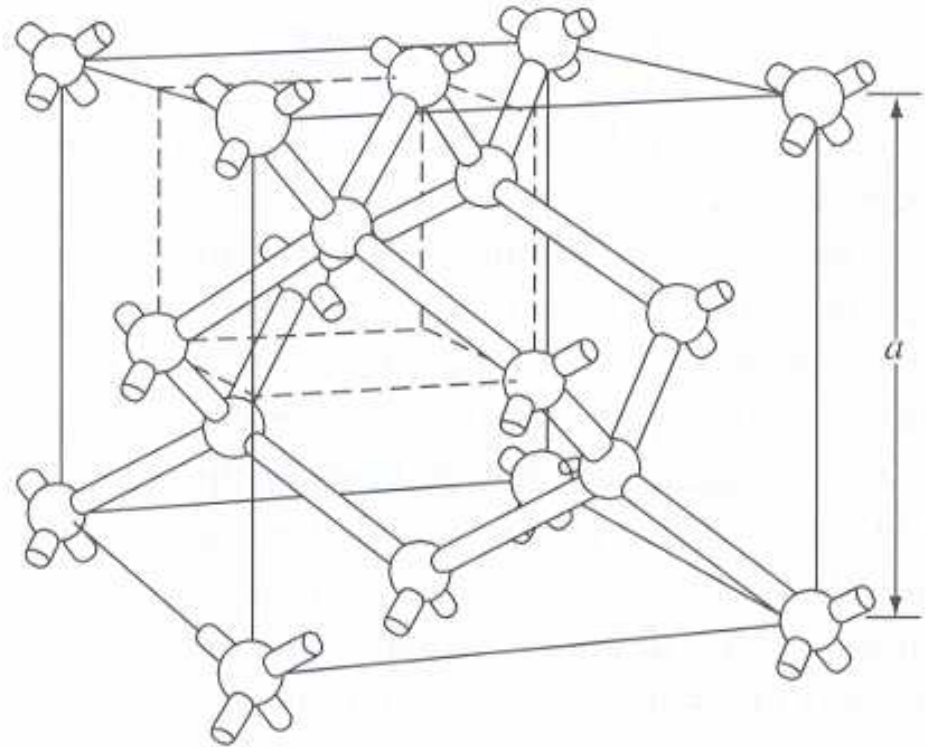


Si-Si kötési energia (“backbond”)

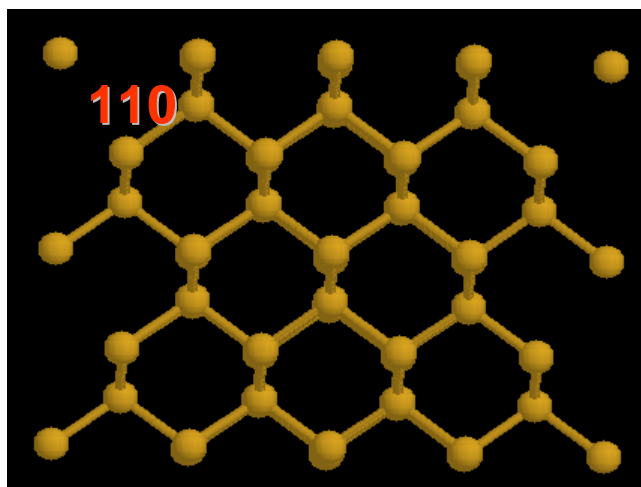
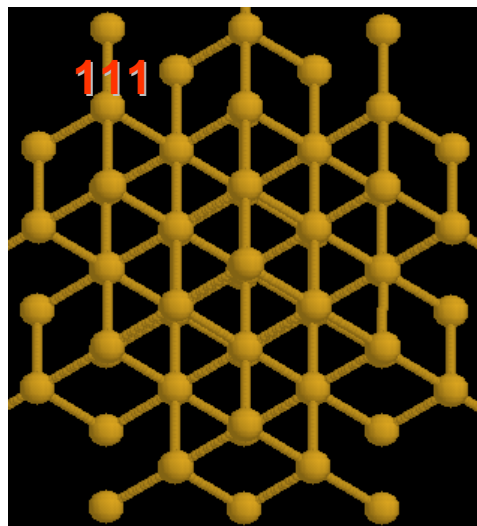
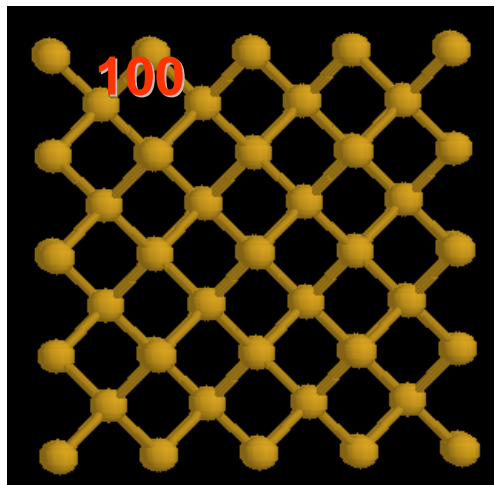
$$E_{\sigma(\text{SiSi})(111)} \gg E_{\sigma(\text{SiSi})(100)} > E_{\sigma(\text{SiSi})(110)}$$

Marási sebesség vs. kristálytani irányok

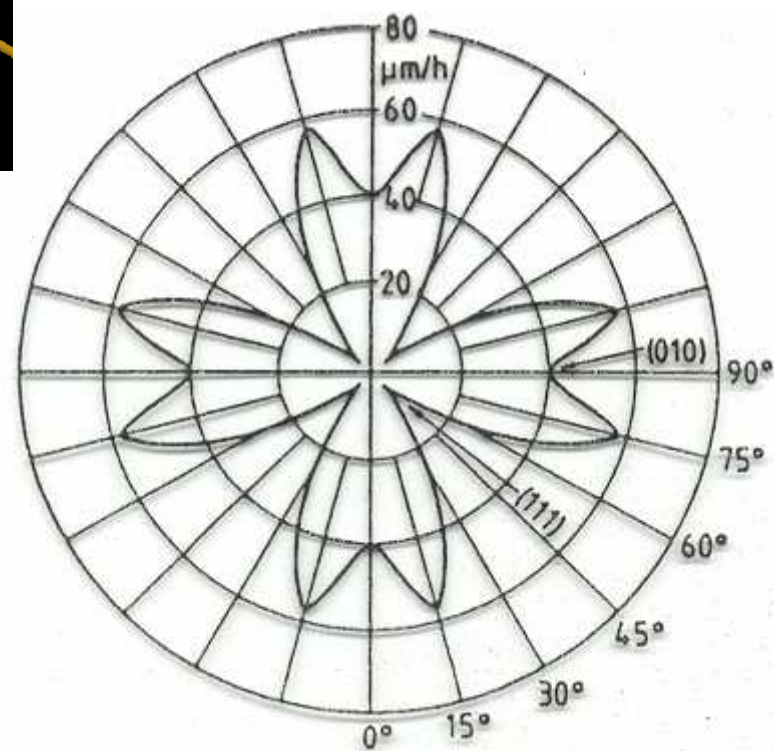
$$v_{\langle 111 \rangle} \ll v_{\langle 100 \rangle} < v_{\langle 331 \rangle}$$



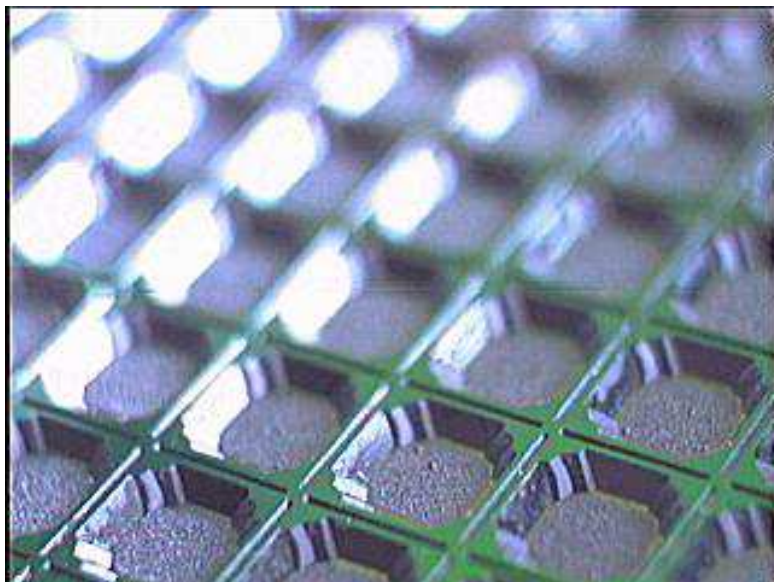
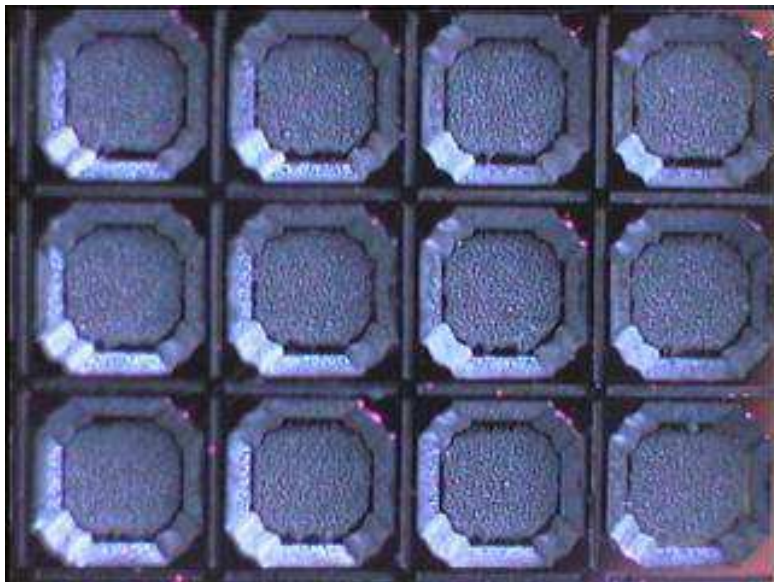
Marási sebesség



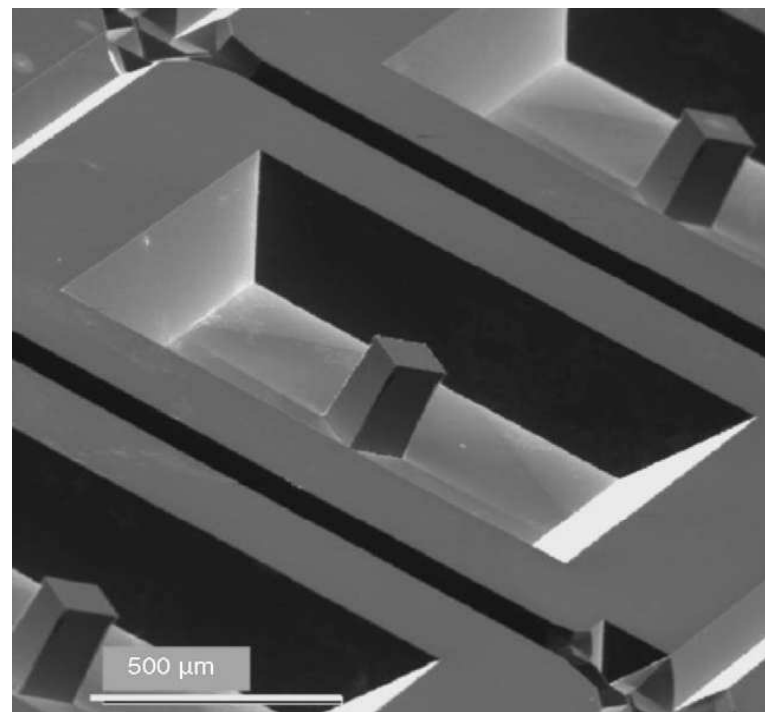
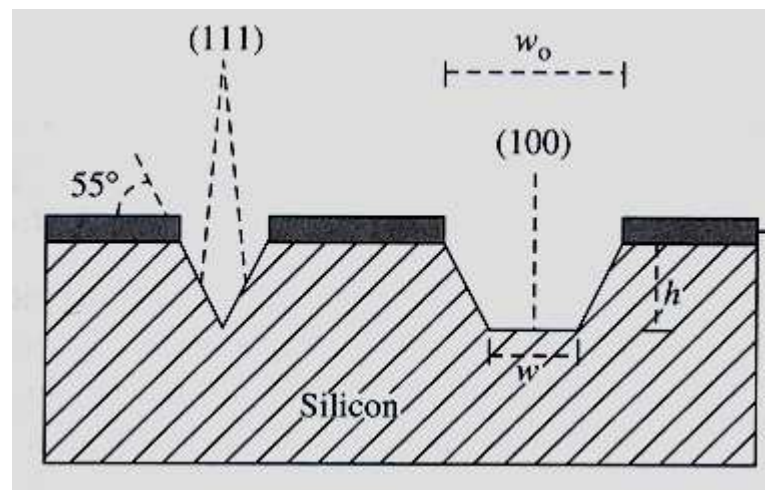
(100) Si kristály



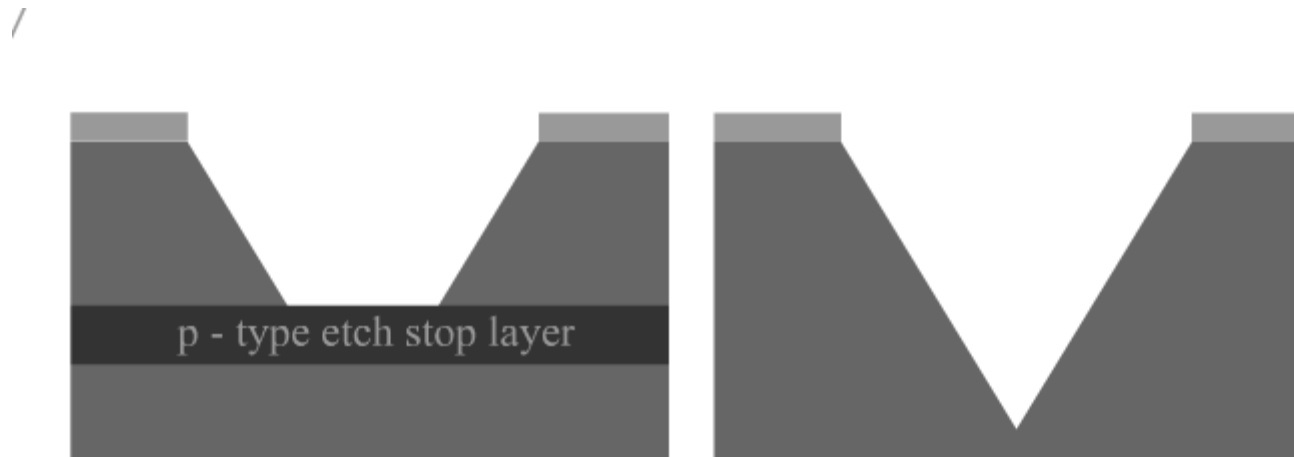
Tömbi mikrogépészet



KOH marás - egyszerűbb alakzatok



Marási mélység beállítása



Marásmegállító réteg: erős p^+ adalékolás (B), néhányszor 10^{19} cm^{-3}

Pórusos szilícium

Nanoszerkezetű anyag

Kiindulási anyag:

Si egykristály v. polikristály

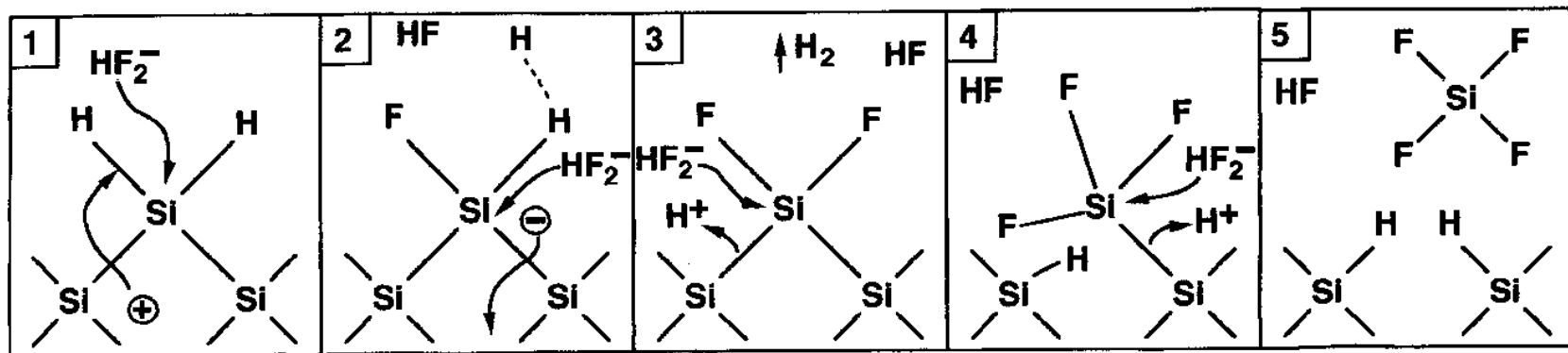
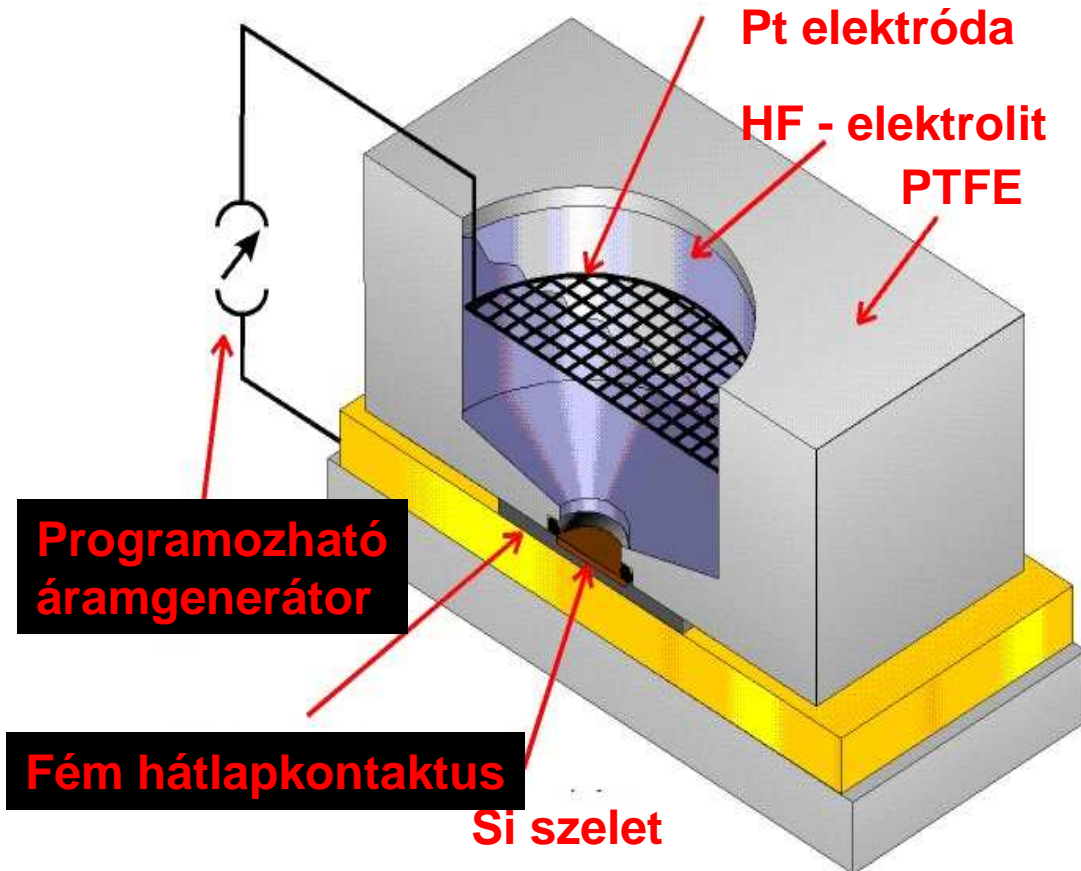
Előállítás:

elektrokémiai marás

(anodizálás) vagy
rozsdamarás (stain
etching)

Eredmény:

Kristályos Si váz + üregek

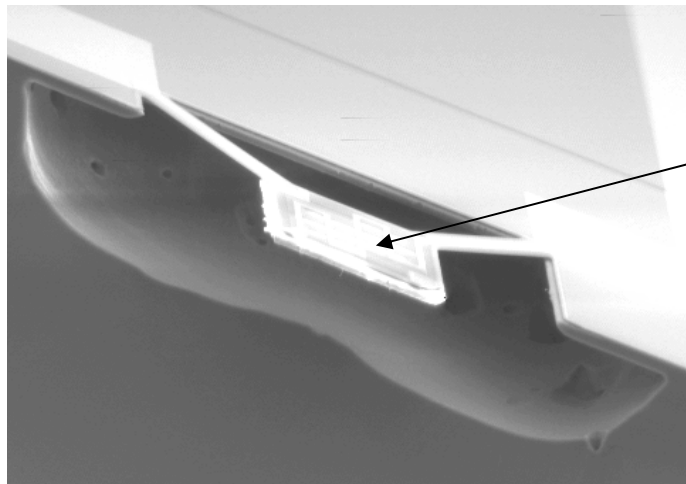
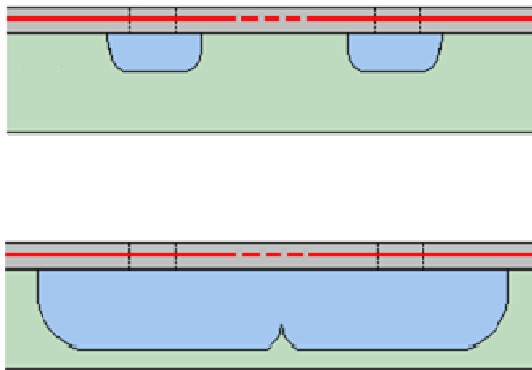


Alkalmas a Si 3D megmunkálására

- feláldozandó segédréteggént (sacrificial layer) előállítás, szelektív kioldás
- funkcionális szerkezeti réteggént (pl: gyenge hővezetés → hőszigetelő réteg, nagy felület → adszorbens, gáz és folyadék (bio)kémiai érzékelő, katalizátor

SiO_2 -ban n-Si szigetek kialakítása

- beállítható törésmutatója miatt → optikai elemek és alkalmazásaik



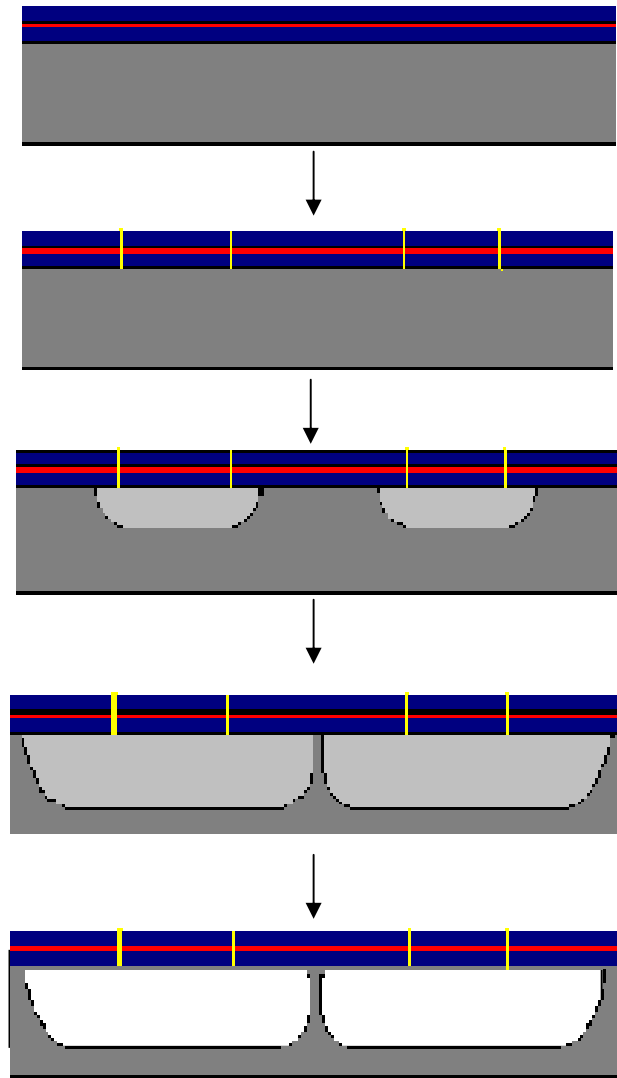
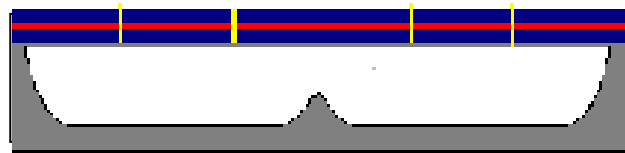
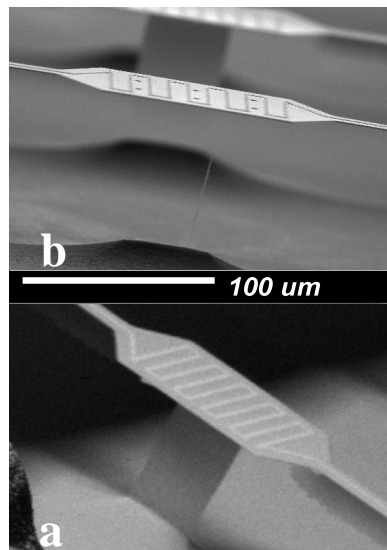
n-Si
 Si_3N_4 , SiN_x
SiC

1. Alkalmazási példa

Si mikrofűtőtestek

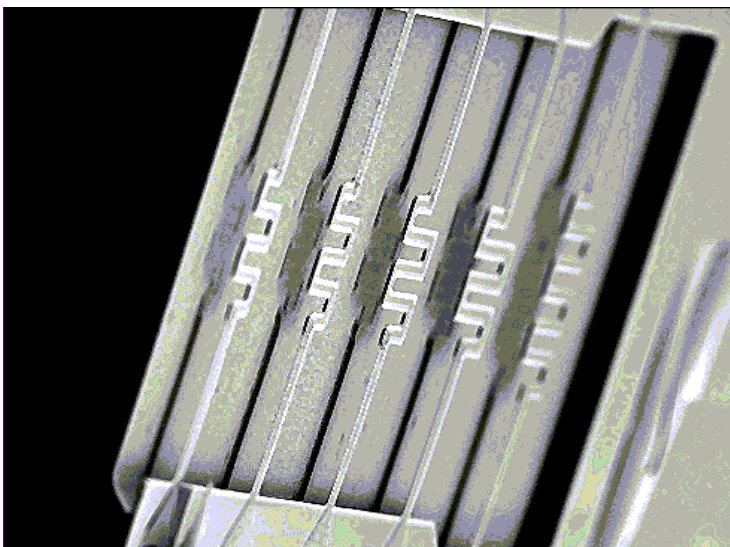
Pórusos Si: $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Pt fűtőtest $\text{SiN}_{1.05}$ membránon

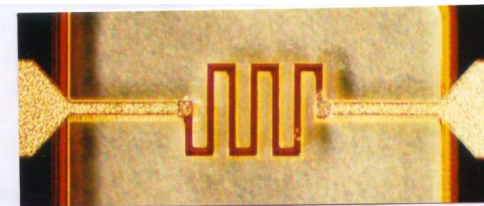




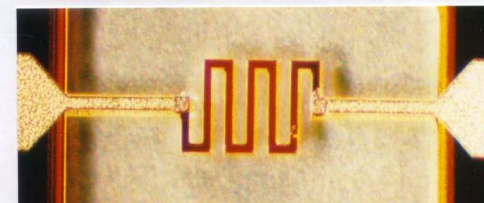
Az MTA MFA-ban pórusos szilícium mikrogépészeti eljárással készült felfüggesztett, azaz termikusan szigetelt, egykristályos Si mikro-fűtőtestek Pt-kontaktusokkal



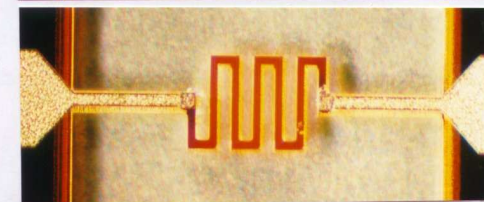
$P_{in} = 0 \text{ mW}$
 $T = 25^\circ\text{C}$



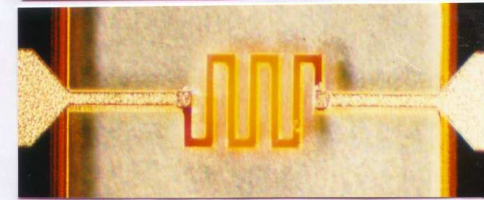
$P_{in} = 30.4 \text{ mW}$
 $T \text{ ca. } 570^\circ\text{C}$



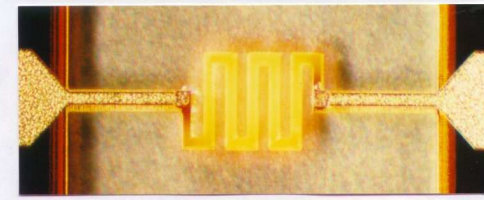
$P_{in} = 33.3 \text{ mW}$
 $T \text{ ca. } 600^\circ\text{C}$



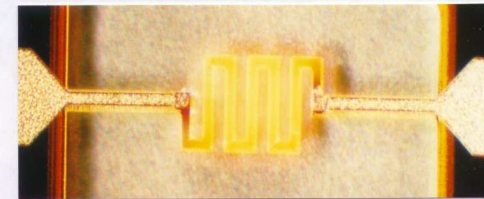
$P_{in} = 34.9 \text{ mW}$
 $T \text{ ca. } 630^\circ\text{C}$



$P_{in} = 40.2 \text{ mW}$
 $T \text{ ca. } 680^\circ\text{C}$

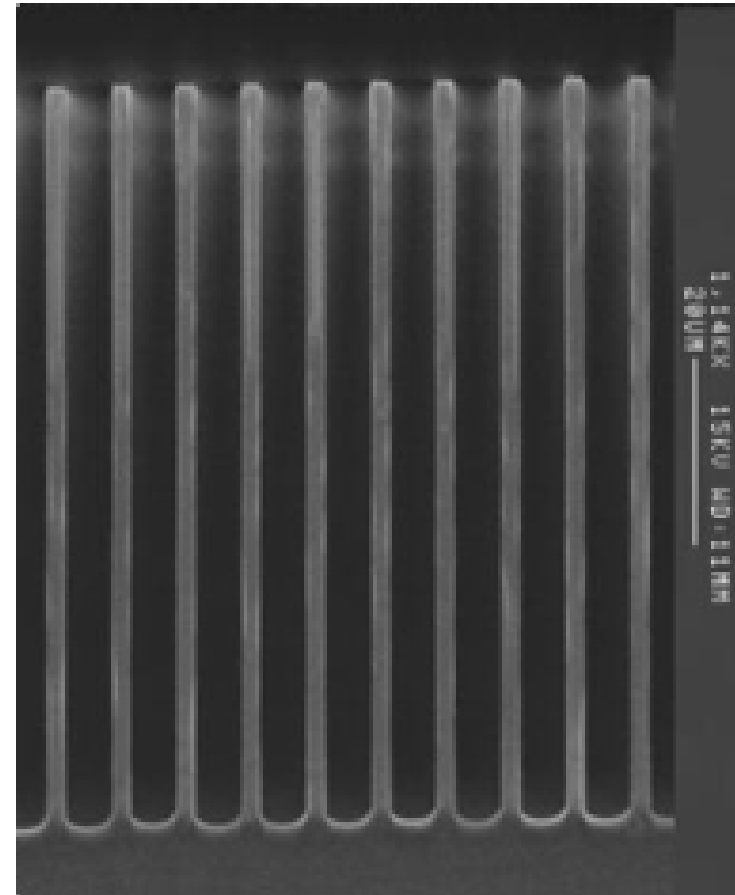
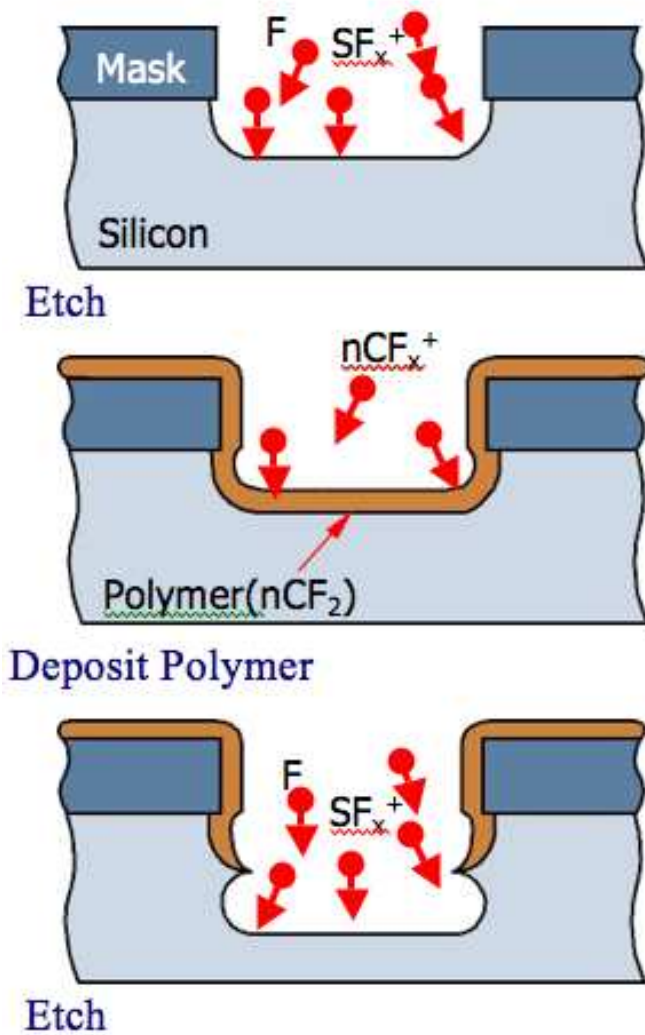


$P_{in} = 44.4 \text{ mW}$
 $T \text{ over } 700^\circ\text{C}$

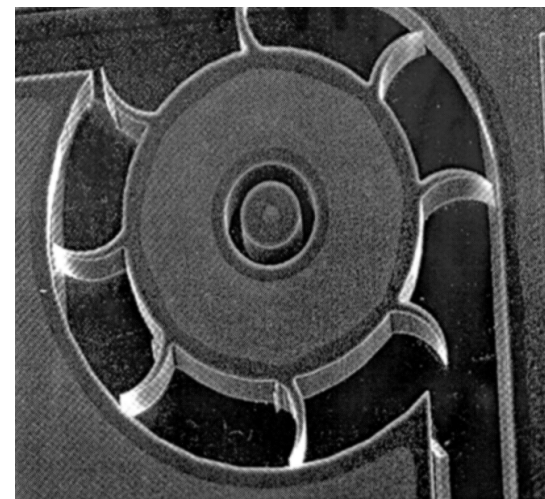
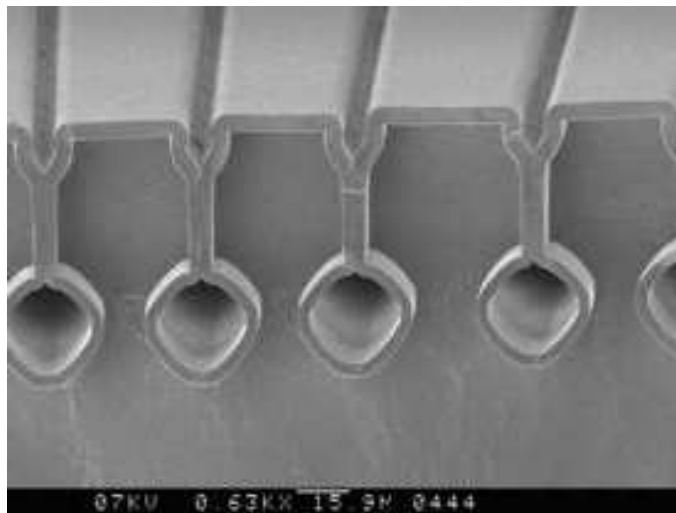
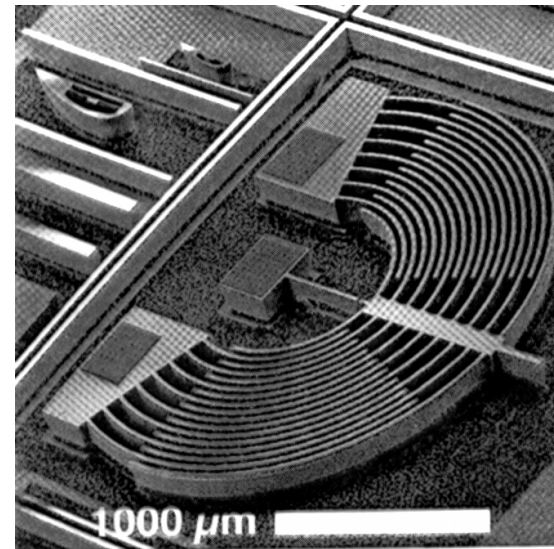
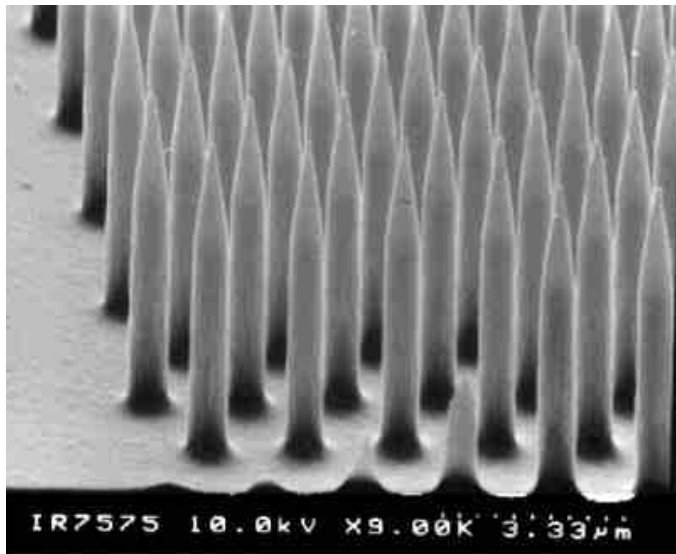


Mély reaktív ionmarás - Deep Reactive Ion Etching (DRIE)

Nagy aspekt-arányú MEMS szerkezetek előállítására



Struktúrák DRIE eljárással



LIGA technológia

Rétegleválasztási és litográfiai módszerek speciális kombinációja:

Litographie, **G**alvanoformung, **A**bformung – LIGA

Áldozati (sacrificial) réteget is beiktatva – SLIGA, ezzel részben szabad, rugalmasan felfüggesztett, illetve teljesen szabad elemek készíthetők.

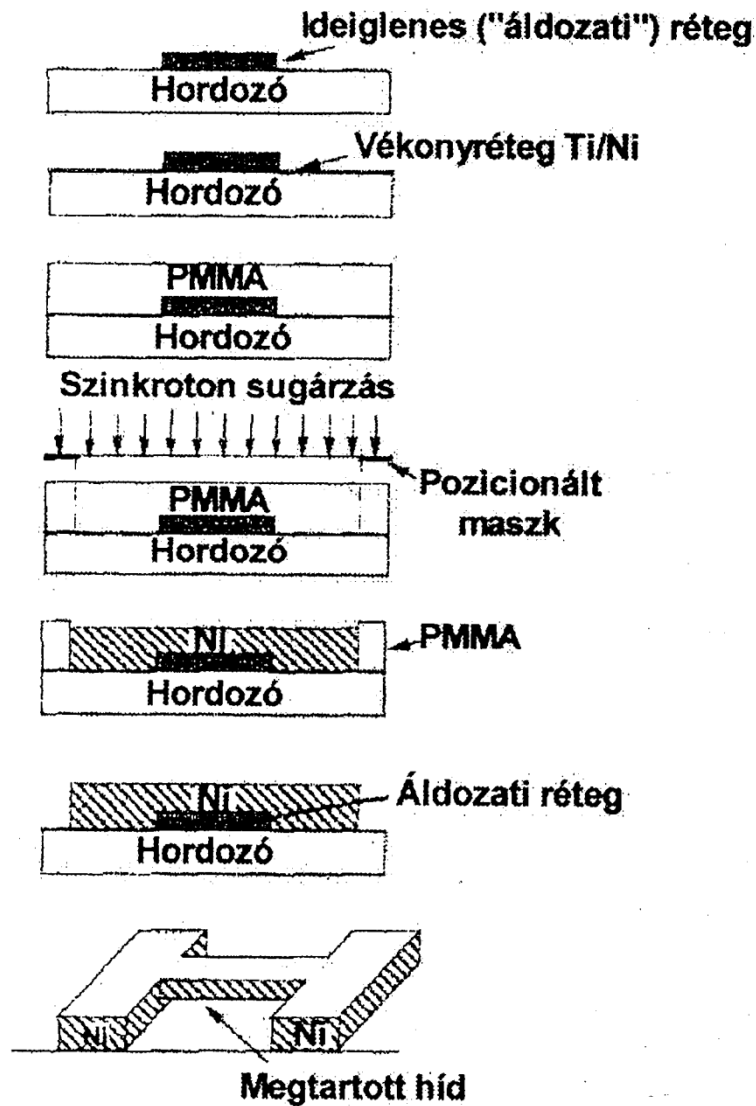
Speciális követelmények:

Röntgen sugárforrás (szinkrotron) $E > 1 \text{ GeV}$, $\lambda < 0,7 \text{ nm}$

Vastag reziszt, tipikusan PMMA (poli-metil-metakrilát – plexi)

Fő előny: 3D mikrostruktúrák, melyek vastagsága hasonló a tömbi mikromechanikai elemekéhez, de a felületi mikromechanika nagyobb flexibilitása megtartásával.

SLIGA



1. Az áldozati réteg leválasztása a hordozóra;
2. jól tapadó fém vékonyréteg leválasztása (pl. Ti/Ni);
3. a röntgensugaras litográfiában fotoreziszt funkcióját betöltő műanyag réteg (PMMA) felvitele, felöntés és hőkezeléses polimerizáció útján;
4. röntgenmaszk pozicionálása és megvilágítás nagyenergiájú szinkrotron sugárzással;
5. előhívás után nikkelt leválasztása galvanizálással a PMMA rétegben kialakított ablakban;
6. a PMMA és a fém vékonyréteg eltávolítása a maszkolt területekről;
7. végül az áldozati réteg eltávolítása.

LIGA

200 μm mély szerkezetek

1., Vastag reziszt leválasztás (PMMA)

2., Röntgen litográfia

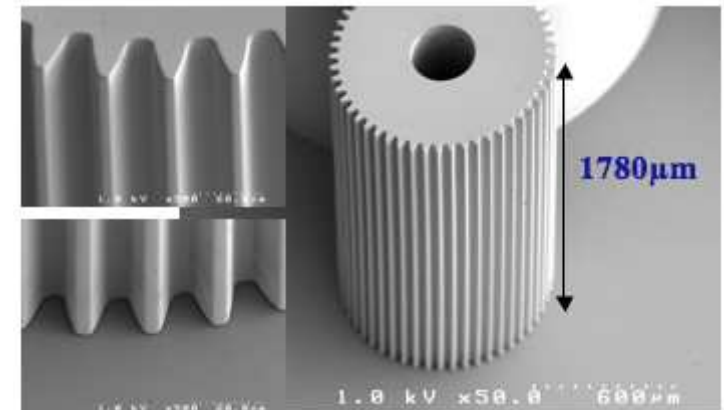
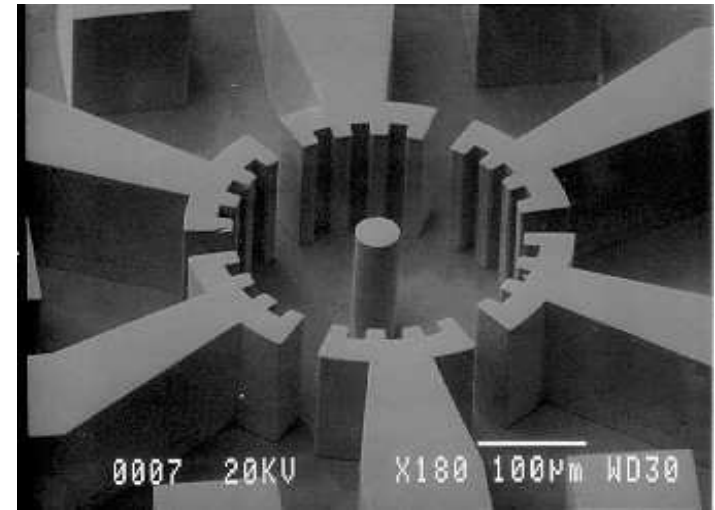
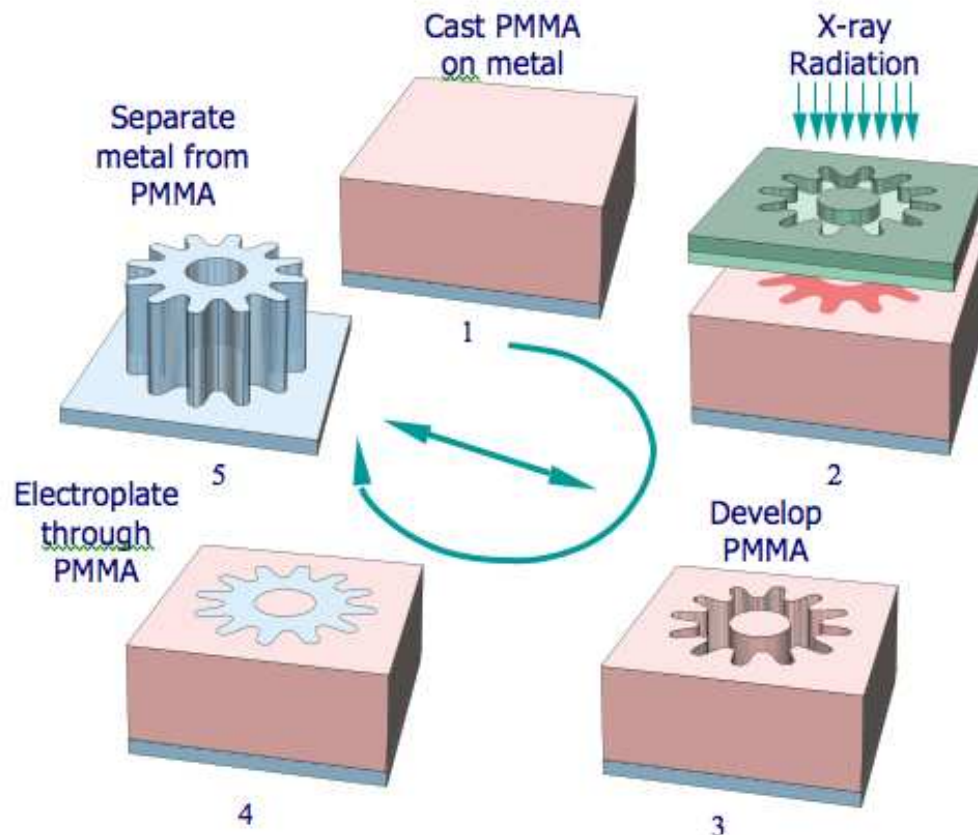
3., Ablaknyitás

4., Elektrolízises Ni leválasztás

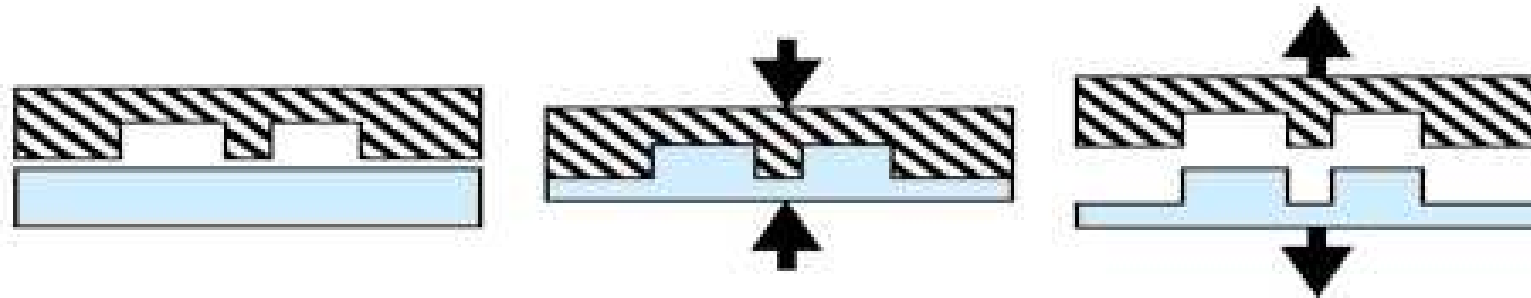
5., Reziszt eltávolítás

A méretek tűrése $\pm 5\mu\text{m}$

Áldozati rétegek: Ti és Cu



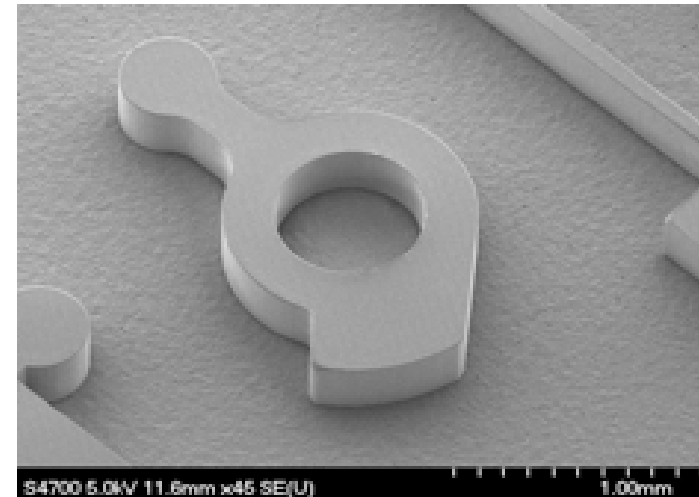
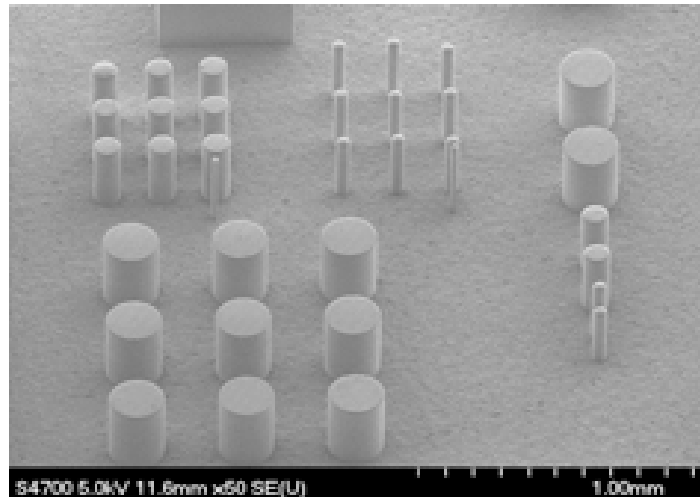
Meleg dombornyomás (Hot Embossing)



Heat plastic substrate and mold insert to above plastic T_g , pull vacuum on chamber.

Apply forces to emboss plastic substrate.

Cool plastic substrate and mold insert to de-molding temperature and apply force to de-emboss.

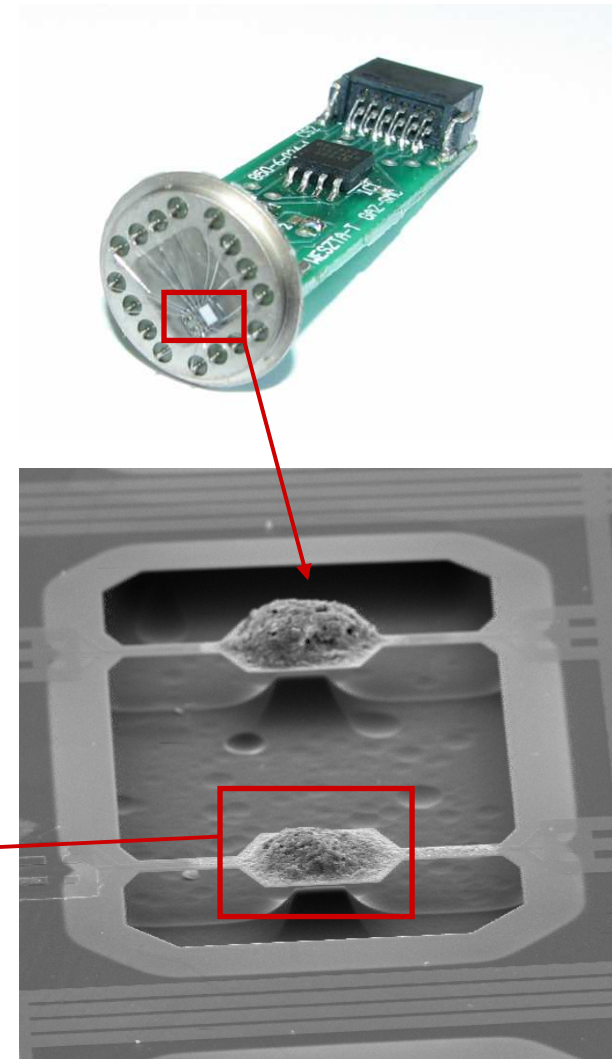
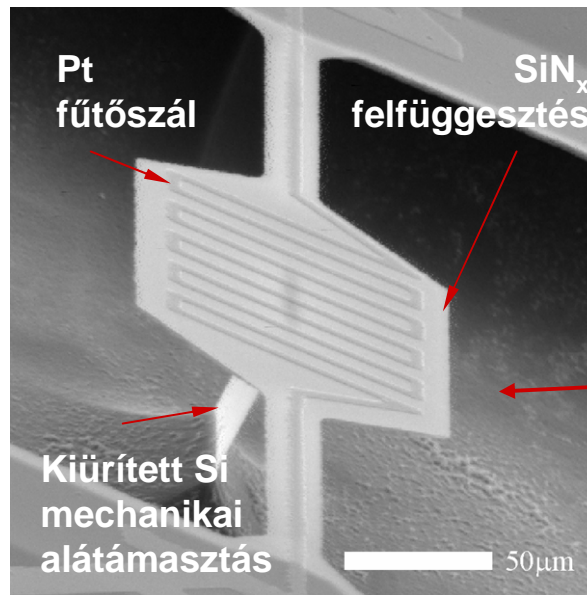


Pellisztor típusú gázérzékelő megvalósítása

- Heterogén katalízis során keletkező hő detektálása (exoterm reakció emelt hőmérsékleten)
- Alacsony teljesítményfelvétel
- Éghető gázok robbanásbiztos detektálása
- Termikusan szigetelt platina mikro-fűtőtest

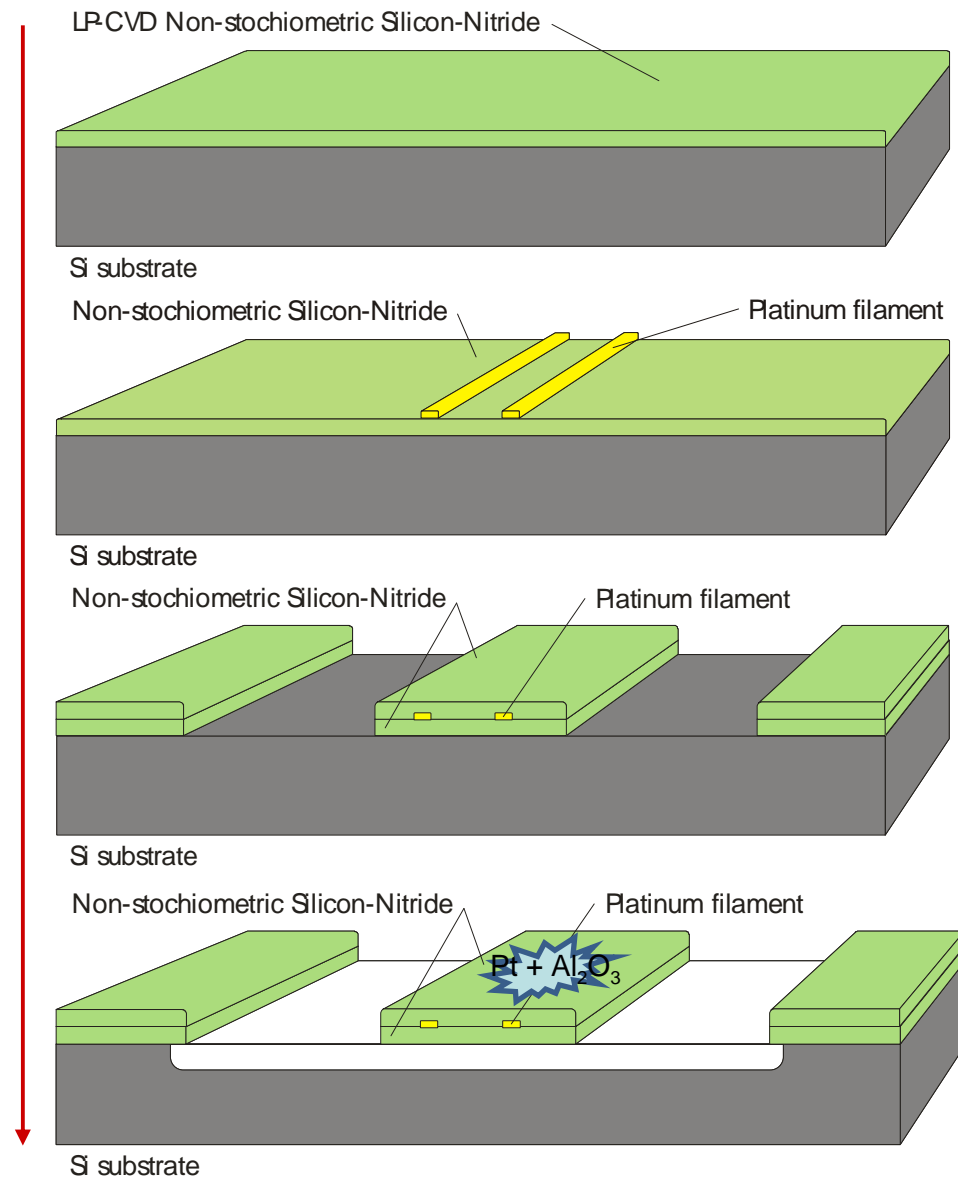
Strukturális anyagok:

- Si_3N_4
- SiN_x
- SiO_2
- SiO_xN_y
- rétegekombinációk



Előállítási technológia

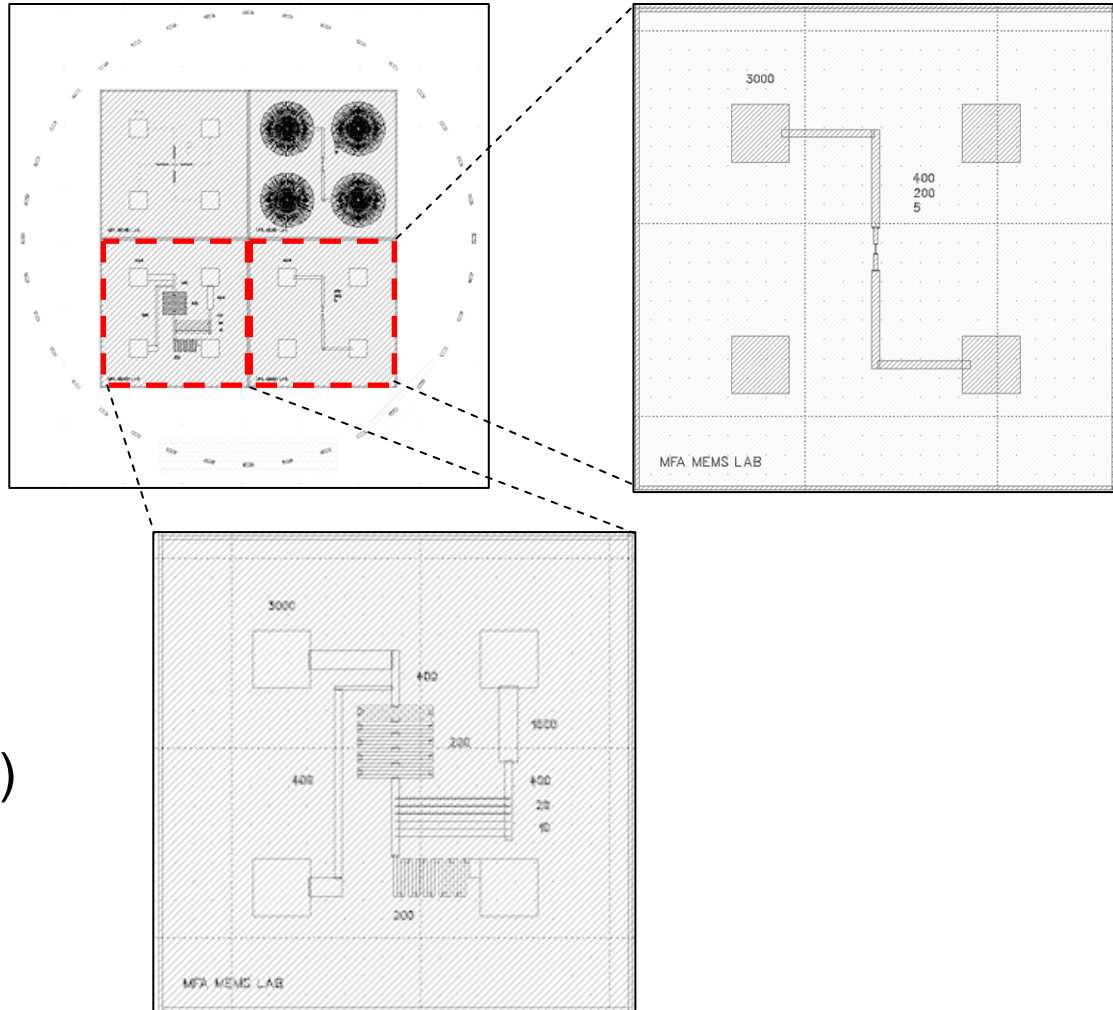
- Nem-stöchiometrikus szilícium-nitrid leválasztása LPCVD, 800°C, $\text{SiH}_2\text{Cl}_2:\text{NH}_3$
- A platina meander kialakítása
- A 2. SiN_x réteg leválasztása és strukturálása
- Pórusos szilícium réteg elektrokémiai kialakítása és szelektív eltávolítása
- Aktív katalizátor réteg (Pt alumínium-oxid mátrixban) leválasztása



Mikrofluidika megvalósítása

Mikrotechnológia, MEMS technológia

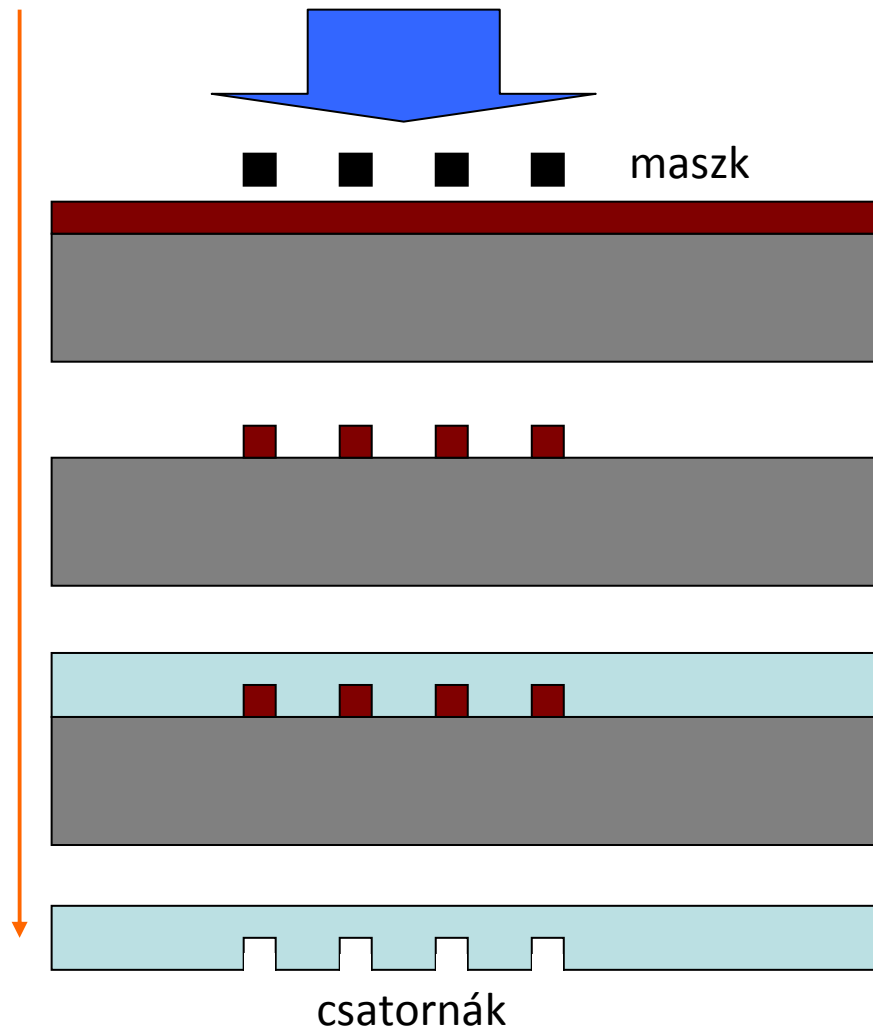
- litográfia
- rétegleválasztás
- 3D marás
- rétegek kötése



ANYAGVÁLASZTÉK

- Si
- PDMS (polidimetilsziloxán)
- SU8 (vastaglakk)

Csatornák kialakítása PDMS polimerben



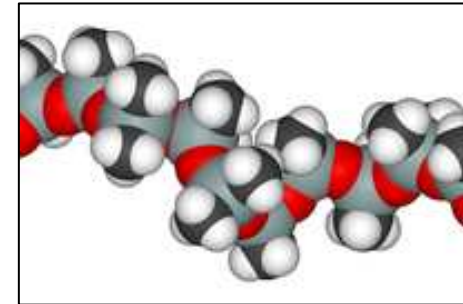
Fotoreziszt

Szilícium hordozó

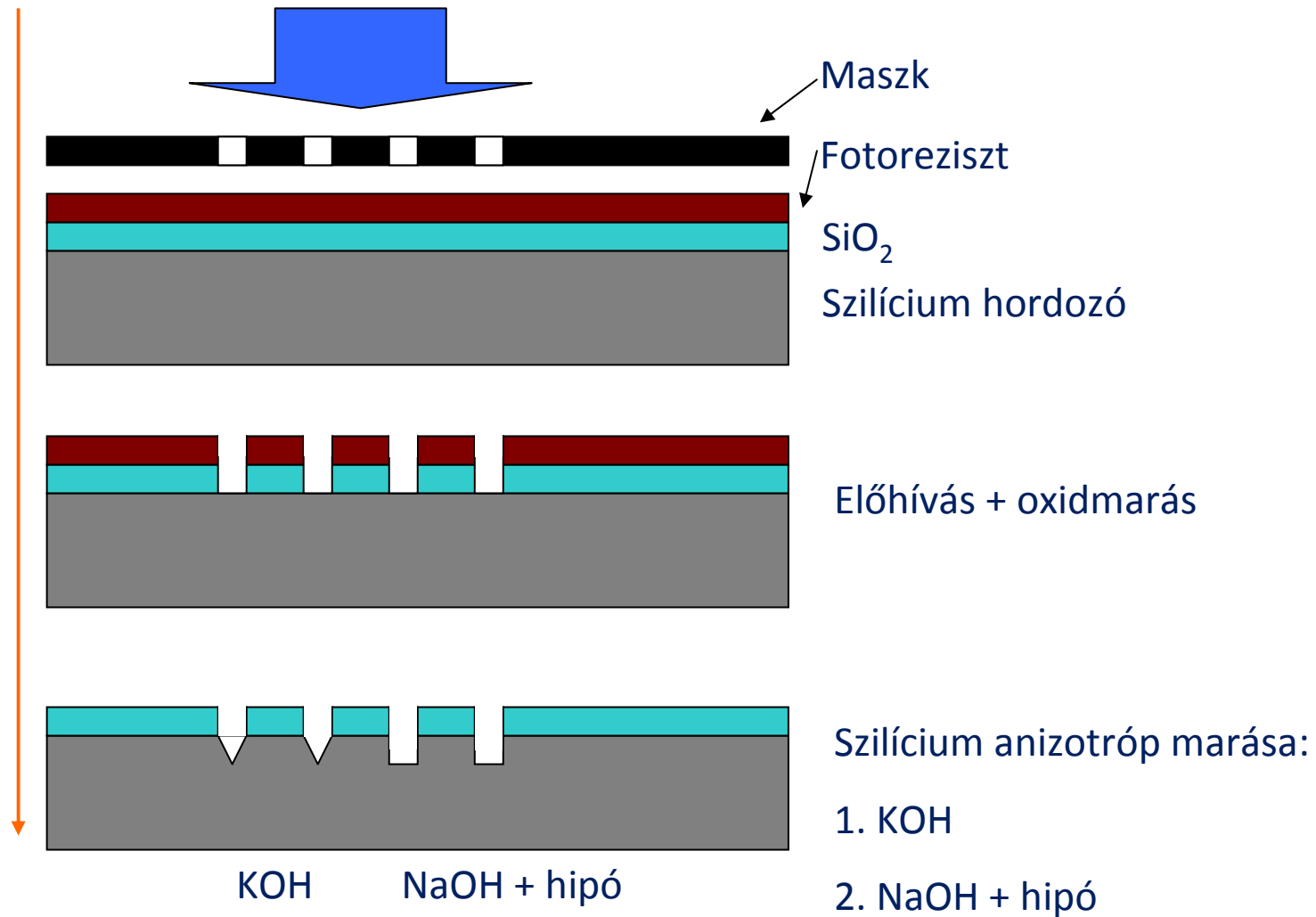
PDMS réteg

Előnyei:

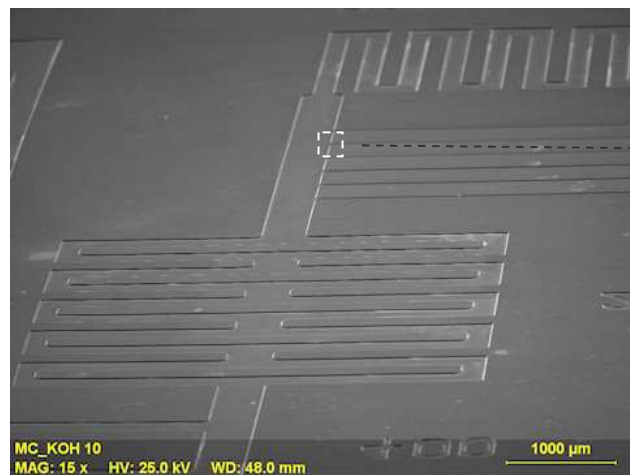
- biokompatibilis, rugalmas
- olcsó, gyors és egyszerű felhasználás
- kovalens kötés önmagával és Si-felülettel
- jó fényáteresztőképesség



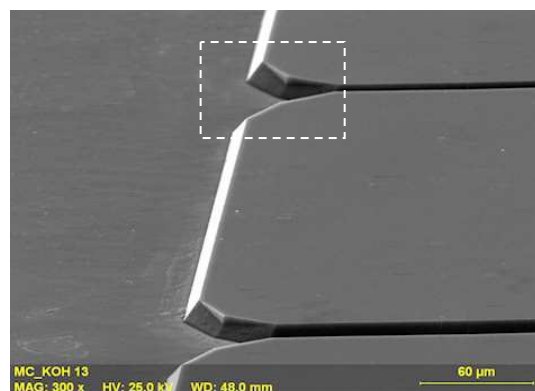
Csatornák kialakítása szilíciumban



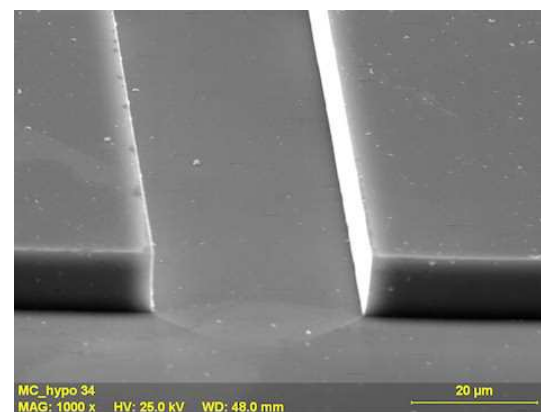
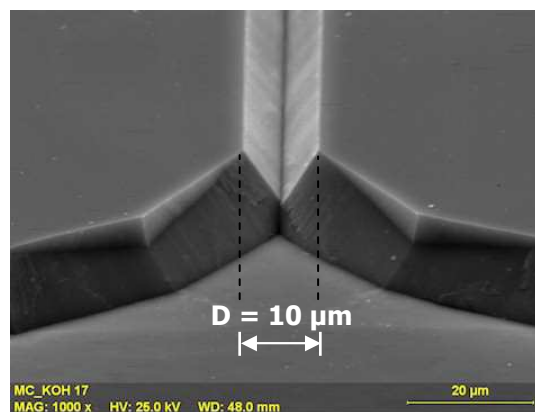
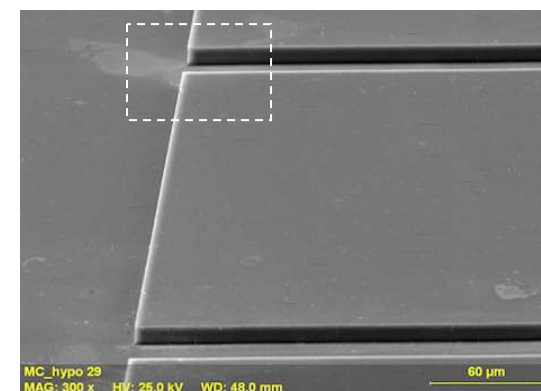
Csatornák kialakítása szilíciumban



KOH



NaOH + hipó



Zárt csatornák kialakítása szilícium és PDMS kötésével

- Csatlakozások kialakítása a PDMS rétegben
- Felületkezelés oxigén plazmában
- Összeillesztés (kovalens kötés)

Folyadék mozgása kapilláris
erők hatására

