



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



MIKRO - ÉS NANOTECHNIKA JEGYZET – MIZSEI JÁNOS
RÉSZEIHEZ

Készítette: Riedl Tamás

1 Tartalom

1. Méretcsökkenés - scaling	3
2. Technológiai alapok.....	3
3. Marási eljárások	4
3.1. Nedves marás	4
3.1.1 Izotróp marás.....	4
3.1.2 Anizotróp (szelektív) marás.....	4
3.2. Száraz marás.....	6
4. Néhány alapvető mikromechanikai technológia.....	8
4.1. SIMPLE (Silicon Micromachining by single step PLasma Etching)	8
4.2. SCREAM (Single Crystal Reactive Etching And Metalisation)	8
4.3. LIGA (Litographie, Galvanoformung, Abformung)	10
5. Feláldozandó rétegek a mikromechanikában	12
6. Fotolitográfia a nanoelektronikában.....	13
6.1. Az optikai litográfia korlátai	14
6.2. Méret csökkentési módszerek.....	14
6.2.1 Fázistoló maszk.....	14
6.2.2 Extrém UV litográfia (lágyszórtás litográfia)	15
6.2.3 Röntgensugaras litográfia.....	15
6.2.4 Ionsugaras litográfia	15
6.2.5 Elektron sugaras litográfia.....	16
6.2.6 Lágyszórtás litográfia	16
6.2.7 Nanogolyós litográfia.....	17

1. Méretcsökkenés - scaling

[1] – folia2.pdf

[2] – intmikjegy.pdf

A skálázási törvény

A makrovilágban elhanyagolható hatások dominánssá válhatnak mikrotartományban és fordítva

- Példa: a térfogati erők gyorsabban csökkennek, mint a felületek:

- Térfogat $V \sim [m^3]$
- Felület $A \sim [m^2]$
- A kettő aránya $A/V \sim [m^{-1}]$ nagyon nagy lesz, ha a méret kicsi
- de pl. a tömeg $M \sim V \sim [m^3]$ és a tömeggel kapcsolatos erők elhanyagolhatóvá válnak

$$a = \frac{F}{m} = \frac{[L^F]}{[L^3]} = [L^{F-3}]$$

$$t = \sqrt{\frac{2xm}{F}} = \sqrt{\frac{[L^1][L^3]}{[L^F]}} = ([L^{4-F}])^{1/2} = [L^{\frac{4-F}{2}}]$$

$$F = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \Rightarrow a = \begin{bmatrix} L^{-2} \\ L^{-1} \\ L^0 \\ L^1 \end{bmatrix} \Rightarrow t = \begin{bmatrix} L^{1.5} \\ L^1 \\ L^{0.5} \\ L^0 \end{bmatrix}$$

$$P = \frac{Fx}{t} = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 \\ L^1 \\ L^1 \\ L^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1.5} \\ L^{-1} \\ L^{-0.5} \\ L^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{0.5} \\ L^2 \\ L^{3.5} \\ L^5 \end{bmatrix}$$

2. Technológiai alapok

A technológiák aszerint, hogy mire irányulnak, két nagy csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartoznak azok, amelyek a hordozó felületére leválasztott rétegekkel kapcsolatosak (felületi mikromechanika), a második csoportba pedig azok, amelyek az egykristályos (szilícium), vagy amorf (üveg, kvarc) hordozók megmunkálására szolgálnak (tömbi mikromechanika). Egyes esetekben sor kerülhet a felületi mikromechanika, és a tömbi mikromechanika együttes alkalmazására is.

A felületi rétegek tekintetében a legfontosabb és a legtöbbet használt technológiai lépések a különféle üvegek, szigetelő és vezető rétegek, valamint a polikristályos szilícium rétegek leválasztása, e rétegek szelektív marással való megmunkálása. A felületen elmozdulásra képes alkatrészek megvalósításához legalább két polikristályos szilícium réteg, és két üvegrétegréteg leválasztása és megmunkálása szükséges, de az állórész - mozgórész - tengely elemhármassal igazán jól három polikristályos szilícium réteg leválasztásával oldható meg.

Az egykristályos szilícium hordozó megmunkálási technológiái közül nagy jelentőségű az alapanyag marási technikájának fejlődése (irányfüggő kémiai marási technikák, plazmamarás, ionmarás, szelektív marási lehetőségek), valamint a több Si vagy üveg hordozó egymáshoz kötési lehetősége (hevítés, présseléssel egybekötve, anódos kötés).

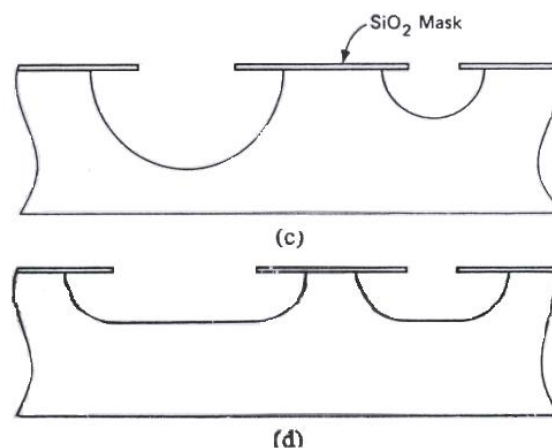
Van azonban néhány szabály, amit célszerű betartani a szilícium mechanikai alapanyagként való alkalmazásához. Az alacsony felületi, tömbi és élek menti hibasűrűség a mechanikai feszültségek minimalizálásának feltétele. A tervezés során ügyelni kell arra, hogy azok a tartományok, ahol jelentős a mechanikai feszültség, kicsik legyenek. A mechanikai megmunkálást lehetőség szerint ki kell küszöbölni, ha mégis sor kerül rá, a sérült részeket le kell marni. Egyes technológiai lépések után (anizotróp marás) nagyon éles sarkok keletkeznek. Ezeket (izotróp maróval) le kell marni, ha fennáll az a veszély, hogy a sarkokban jelentős mechanikai feszültség alakul ki. Kerülni kell a szilícium felületek egymáshoz való súrlódását. Si_3N_4 vagy SiC bevonat alkalmazása előnyös. Végül, mint az a mikrorendszerek technológiájában általános, lehetőség szerint alacsony hőmérsékletű technológiákat kell használni.

3. Marási eljárások

3.1. Nedves marás

3.1.1 Izotróp marás

- mindig van alámaródás (ezt mikromechanikai szerkezetek előállításánál ki is használják)
- Az izotróp marók, pl. Fluorsav, salétromsav és ecetsav keveréke az anizotróp marókkal ellentétesen viselkednek. Ezek marási sebessége nagy az erősen adalékolt Si-ban, és lelassul a maródás a nagytisztaságú n ill. p anyagban.



1. ábra: Izotróp marás

3.1.2 Anizotróp (szelektív) marás

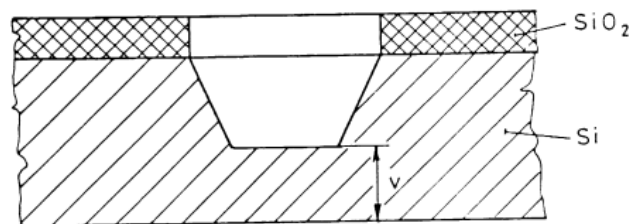
Az $\langle 111 \rangle$ irányban nem mar (vagyis csak sokkal lassabban mar), $\langle 100 \rangle$ irányban viszont gyorsan.

Az anizotrópia a marási sebesség irányfüggésének következménye. Az irányfüggés oka lehet az, hogy egykristályos anyagokban, a különféle kristálysíkokban a rácsatomok sűrűsége nem azonos. Példa erre a Si egykristály. Ebben a legnagyobb az atomsűrűség az $\langle 111 \rangle$ sík felől nézve, tehát ebből

az irányból legkisebb a marás sebessége. Anizotrópia eredhet magából a marási folyamatból is. Egyes eljárások ugyanis a megmunkálandó felületre merőlegesen nagyobb sebességgel működnek. Ekkor a maszk alá maródás kicsi, így igen meredek falú árkok készíthetők.

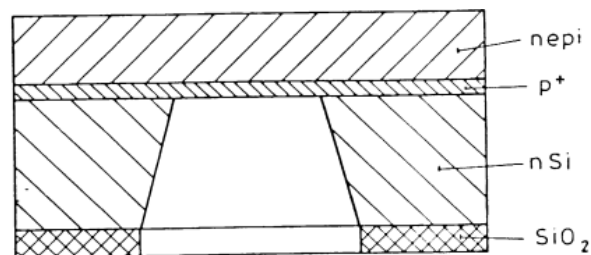
Egyes szervesetlen lúgok (NaOH, KOH) tömény vizes oldata, valamint szerves vegyületek (legismertebb az etilendiamin és pirokatechin vizes oldata, EDP) a szilícium egykristályt a felület orientációjától függő sebességgel oldják. Legkisebb az oldási (marási) sebesség az $\langle 111 \rangle$ orientációban, kb 50-szer ekkora az $\langle 100 \rangle$ és 30-szor az $\langle 110 \rangle$ irányokban.

Mikromechanikai alakzatok készítése során gyakran előfordul, hogy adott vastagságú membrán készítése a cél (2. ábra). Ebben az esetben a marást szigorú feltételekkel (stabil áramlási feltételek és pH-érték, hőmérséklet, marási idő) kellene elvégezni. Ez igen nehéz művelet és a pontos méretek sem tarthatók, különösen néhány μm vastag membránok esetén.



2. ábra: Membrán készítése anizotróp marással

A bórral erősen adalékolt ($N > 7.1019 / \text{cm}^3$) "p" típusú szilícium marása igen lassú, az ilyen réteggel a marás leállítható. (A p^{++} -ban lévő lyukak elnyelik (rekombináció folytán) az elektronokat, ez gátolja a marást.) A marási stop felhasználásához "n" típusú, néhány ohm cm fajlagos ellenállású szelektív rétegből kell kiindulni. Az aktív membrán felőli oldalon bór implantációval erősen adalékolt, néhány tized μm vastag "p+" réteget létrehozva, majd erre a rétegre a kívánt membránnak megfelelő vastagságú "n" típusú epitaxiális réteget növesztve a szilícium alulról a membránig kimartható.



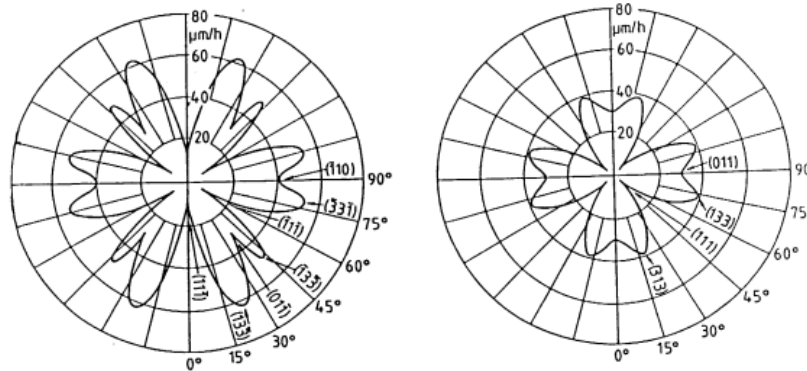
3. ábra: Pontos vastagságú membrán készítése marási stop technikával

Az epitaxiális réteg ugyanolyan egykristály szerkezetű, mint az alap, benne elő lehet állítani a szükséges érzékelő vagy beavatkozó elemeket, a hozzájuk tartozó áramkörrel együtt.

Az izotróp marók, pl. Fluorsav, salétromsav és ecetsav keveréke az anizotróp marókkal ellentétesen viselkednek. Ezek marási sebessége nagy az erősen adalékolt Si-ban, és lelassul a maródás a nagy tisztaságú n ill p anyagban.

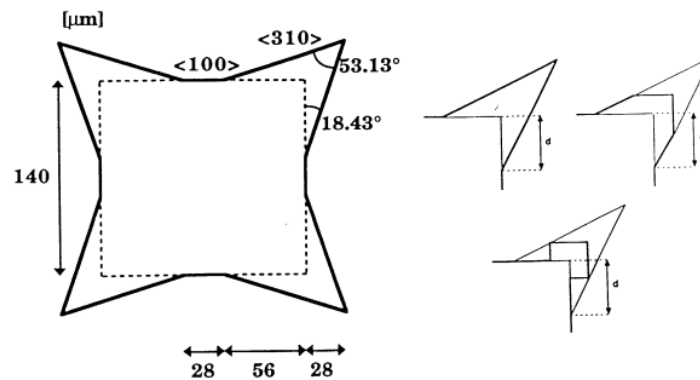
A különböző orientációjú hordozókon a maszk élének irányától és a marószertől függően tehát változatos geometriájú "V" és "U" bemarások készíthetők.

Az irányfüggő marási technikák alkalmazása során a jól illesztett maszk élek mentén az alámarás elenyésző mértékű. A konvex sarkok közelében azonban olyan kristálysíkok is ki vannak téve a maró hatásának, amelyekre a marási sebesség nagyobb. A jelenség kiküszöböléséhez figyelembe kell venni az alámarás sebességének irányfüggését (4. ábra).



4. ábra: Alámarás irányfüggése <111> és <110> orientációjú felületeken

Az alámarási jelenséget fel lehet használni konzol készítésére olyan maszk alakzattal is, amelynek minden éle jól orientált, tehát a maszk alól elvileg nem lenne lehetséges a szilícium kimarása. Az alámarás azonban egyes alakzatokat eltorzíthat. A felületből kiemelkedő alakzatok sarkai hosszabb marási idő esetén a különböző irányoknak megfelelő eltérő marási sebességek következtében sokszög alakzatot vesznek fel. A jelenség hatása csökkenthető sarok kompenzációval, ami a maszk olyan kiképzését jelenti, hogy az a külső sarkoknál késleltesse a marást (5. ábra).



5. ábra: Kompenzált maszkok a sarok környéki alámaródások elkerülésére

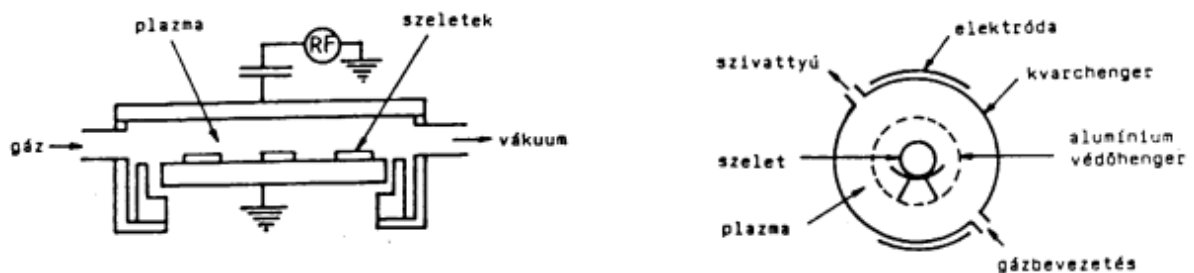
A marási folyamat elektrokémiai úton is leállítható. Az "n", illetve "p" adalékolású szilíciumra ugyanis különbözőek a passzívációs potenciálok. Az elektrolitikus marás során úgy lehet beállítani a külső feszültségeket, hogy az "n" adalékolású szilícium szelektíven oldódjon.

3.2. Száraz marás

A marás ionizált gázok segítségével történik. Az oldási műveleteknél nem kívánt mellékhatások is megjelentek, amit szeretnénk elkerülni. Ezek voltak a buborékképződés (rúcskös lesz tőle a felület) és a csapadékképződés (az oldódás (diffúzió) lassabb, mint a marás, ez korlátozza a sebességet, emiatt

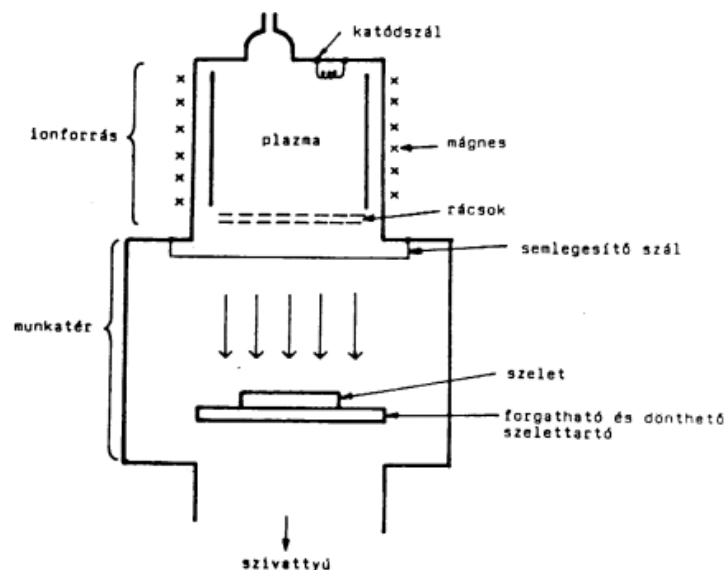
van a csapadékképződés). Itt is létezik izotróp és anizotróp maró, de itt az izotrópia fogalma különbözik a nedves marókétól. Az anizotrópia ebben az esetben a maszk árnyékoló hatásának eredménye, és rendszerint a nagyobb energiájú plazmákkal kapcsolatban érvényesül.

Kisebb plazmaenergia esetén a marási folyamat alapvetően kémiai reakciók eredménye. A 100-500 μ eV energiájú reaktív ionokból (SF_6 , CCl_4 , CHF_3) álló plazma a Si-mal kémiai reakcióba lép és illékony vegyületeket képez. A plazma előállítható 1-10 Pa nyomáson sík elektródák között, vagy hengeres elrendezésben, nagyfrekvenciás gerjesztéssel (6. ábra).



6. ábra: A plazmamaró megvalósítási lehetőségei

Nagyobb plazmaenergia esetén a marás alatt fizikai folyamatok kerülnek előtérbe. Ezt az is mutatja, hogy nemesgáz-ionokkal is lehetséges marni (fizikai marás, katódporlasztás). A marási anizotrópia abból adódik, hogy a nagyenergiájú ionok leporlasztják a céltárgy felületi atomjait. A porlasztás hatásfoka merőleges beesésnél a legnagyobb, így a marás a felületre merőleges irányban a leggyorsabb. Az eljárás hátránya, hogy a marás sebessége csak kevésbé függ az anyagtól, tehát a maszkoló réteg is roncsolódik. Ezt a hátrányt csökkenti a reaktív ionsugaras marás. Ez a fizikai marás és a kémiai marás kombinációja: nagyenergiájú marás az előzőekben leírt ionizált fluoridokkal, kloridokkal. A reaktív ionsugaras marás szelektivitása jó, tehát a marni nem kívánt réteget nem, vagy csak nagyon kis mértékben károsítja, ugyanakkor jelentősen nagyobb a marási sebesség a felületre merőleges irányban. Az ionmarás nagy előnye, hogy igen kisméretű alakzatok is előállíthatók, és így a felületre merőlegesen tetszés szerinti alakú és mélységű szerkezeteket lehet kialakítani. Az ionmaró vázlatos képét mutatja a 7. ábra.



7. ábra: Ionmaró vázlata

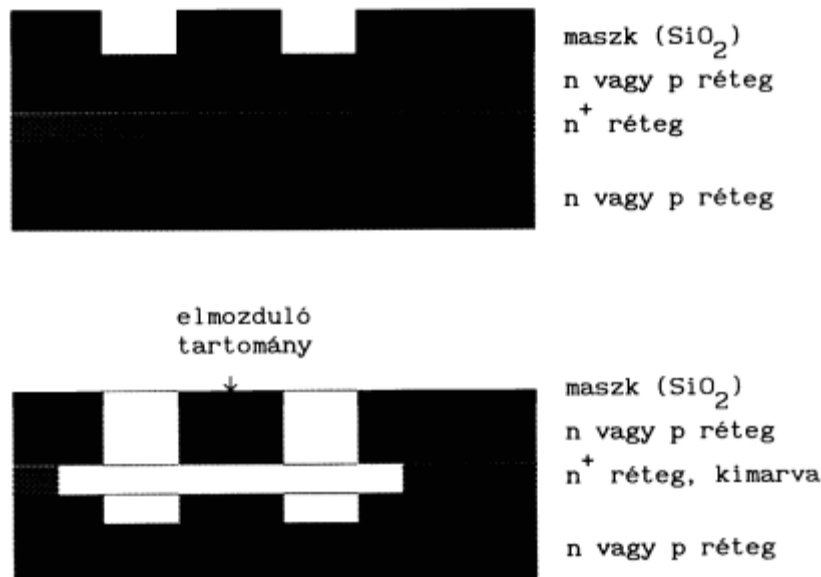
4. Néhány alapvető mikromechanikai technológia

4.1. SIMPLE (Silicon Micromachining by single step Plasma Etching)

Az eljárás alapváltozatához olyan egykristályos hordozó szükséges, amely epitaxiális réteg alatt megfelelően kialakított n+ eltemetett réteget tartalmaz (8. ábra).

A tervezett alkatatok egyetlen marási lépésben alakíthatók ki Cl_2 alapú plazmamarással annak következtében, hogy ez a marási módszer anizotróp a p, illetve a gyengén adalékolt n szilíciumra, az n+ szilíciumra nézve viszont izotróp. Arra való tekintettel, hogy a maszk/Si szelektivitás kicsi lehet, viszonylag vastag maszkréteg szükséges a felületen, hiszen a maszk anyaga is maródik.

Az eljárás előnye egyszerűsége, és illeszkedése a mikroelektronikai technológiákhoz.



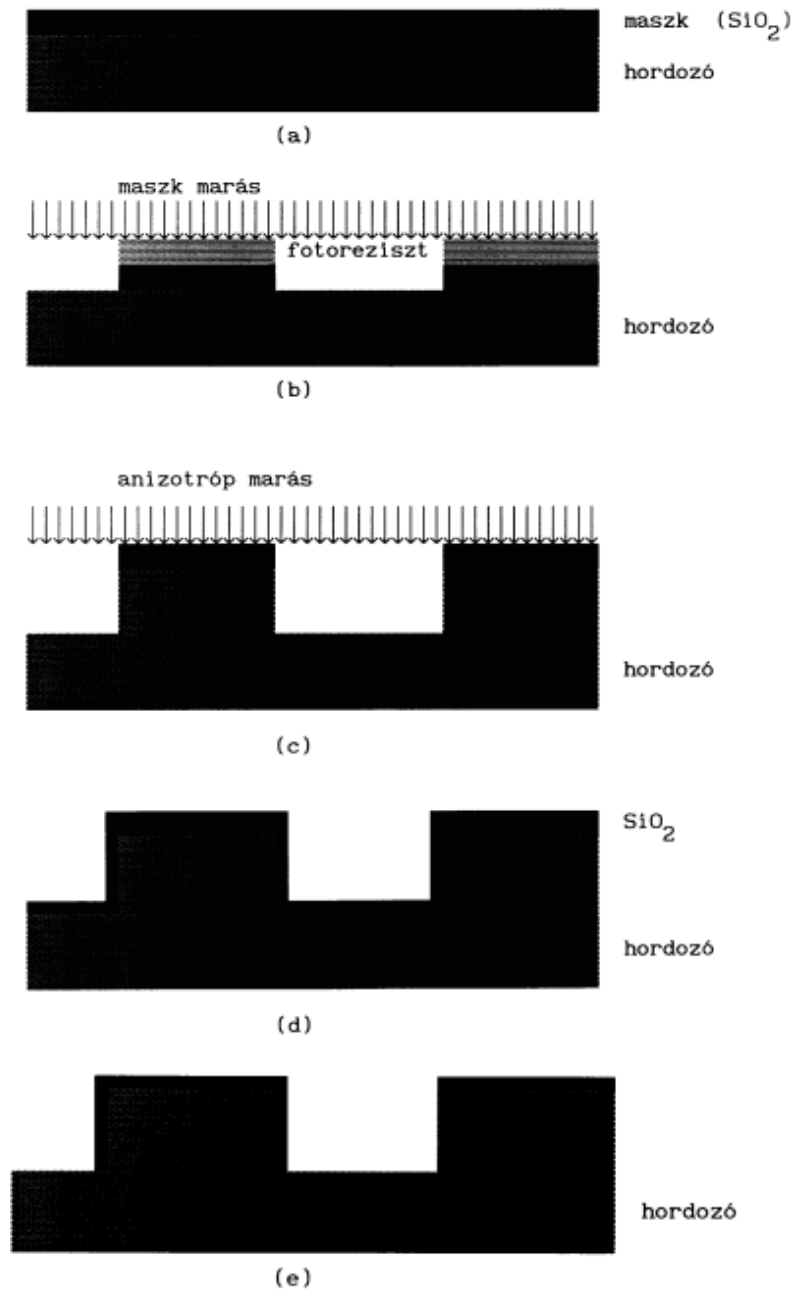
8. ábra: A SIMPLE technológia alapváltozata: rétegszerkezet a marás előtt, és a marás után

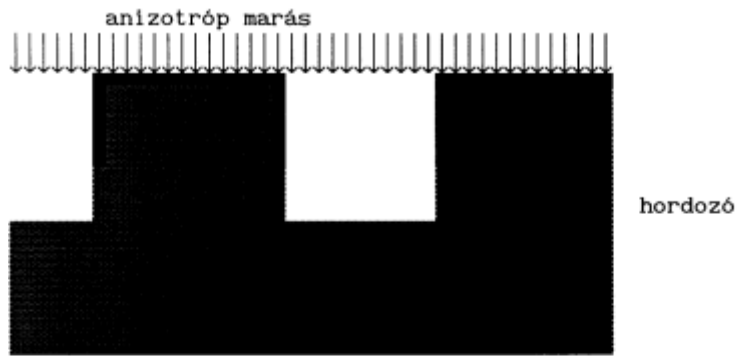
Az eljárás során az "n+" tartomány szerepel feláldozandó réteggént. SOI (silicone on insulator) hordozón is lehet hasonló technológiai lépéssor alkalmazásával mozgásképes elemeket készíteni. Az "n+" tartomány marása helyett ilyenkor a felső szilícium réteg alatti szigetelőt egy, esetleg a felső réteg marásához használt módszertől különböző izotróp szelektív marással kell eltávolítani.

4.2. SCREAM (Single Crystal Reactive Etching And Metalisation)

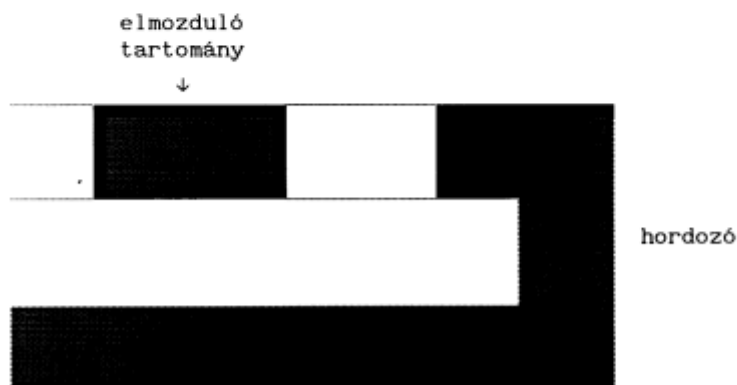
A hordozóra először a maszk oxid kerül fel (a) plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztással (PECVD). Ez a réteg a szokásos fotoreziszt technikával megmunkálható (b). Anizotróp marással a szilícium hordozóba meredek oldalfalú és igen mély árkok marhatók (c). Az egész szerkezetre (az oldalfalakra is) újabb oxid kerül fel (d) ismét plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztással, amely az árkok fenekéről szelektív anizotróp marással távolítható el (e). Anizotróp marással tovább mélyítve a szilíciumba mart árkokat (f), majd izotróp marással az elmozduló elemek alá marva alakul ki a kész szerkezet (g), amelyre szükség esetén még egy katódporlasztással felvitt fémréteg kerülhet (9. ábra).

Lehetőség van valamennyi rétegeltávolítási és rétegépítési lépés plazmás eljárással való kivitelezésére, így a folyamat nagy része egyetlen berendezésben és egyetlen vákuum ciklusban végrehajtható. A fotoreziszt O_2 , az oxid CHF_3 és CF_4 plazmával távolítható el, a szilícium Cl_2 plazmával anizotróp, illetve SF_6 plazmával izotróp módon martható.





(f)



(g)

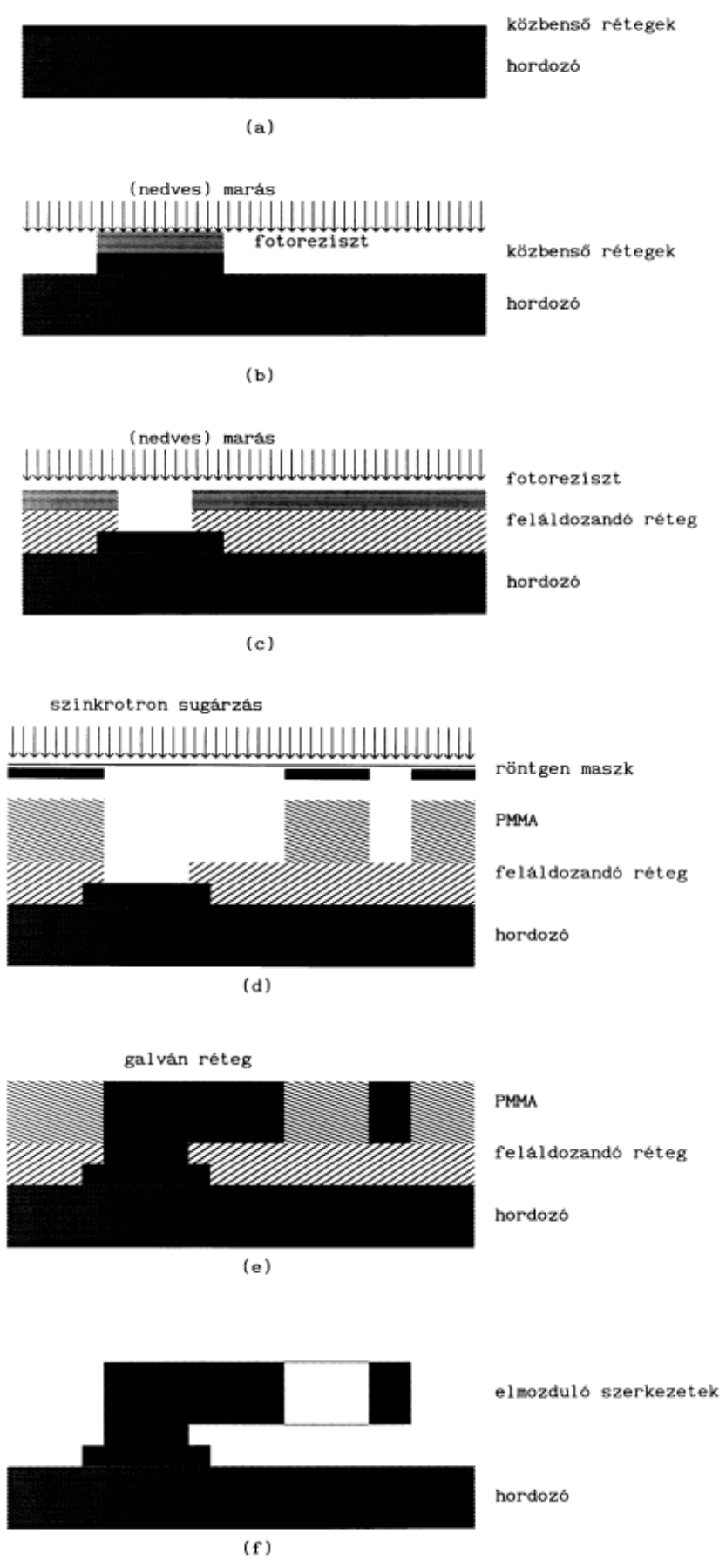
9. ábra: A SCREAM technológia

A SCREAM eljárás érdekessége, hogy a szerkezet oldalfalára leválasztott réteg maszkoló hatásának kihasználásával szemlélteti annak a lehetőségét, hogy miképpen terjeszthető ki a megmunkálás a felületre merőleges irányon túlra, azaz az oldalfalakra.

4.3. LIGA (Litographie, Galvanoformung, Abformung)

A mikromechanikai szerkezetek konstruálása során gyakran szükséges a csíkszélességhez képest igen vastag réteg előállítása. Erre a célra fejlesztették ki a LIGA (Litographie, Galvanoformung, Abformung) technológiát. Ennek alapelve emlékeztet a nyomtatott áramköri lemezek gyártástechnikájára, amely során gyakran alkalmazott rajzolatgalvanizálásra. A nagy elérhető rétegvastagságot a speciális röntgen fotoreziszt, a mozgó alkatrészek felülettől való eltávolítását pedig feláldozandó réteg alkalmazása teszi lehetővé. Az eljárást a 10. ábra szemlélteti.

A hordozóra először egy, esetleg összetett közbenső réteg kerül (a). Ennek célja a jó tapadás (króm alap), valamint a jó vezetés (ezüst fedőréteg) elérése. Ez a réteg a hagyományos fotolitográfiai módszerekkel megmunkálható (b), csakúgy, mint a fölébe kerülő feláldozandó réteg (c). Az elkészítendő formát a felületre felvitt PMMA röntgen maszkon keresztül megvilágítja (szinkrotron sugárzás), majd a besugárzott részek kioldása (előhívás) adja (d). A kioldódott PMMA helyébe elektrolitikus úton leválasztott réteg kerül (e). Az utolsó lépés a PMMA és a feláldozandó réteg kioldása (f).



10. ábra: A LIGA technológia

A LIGA technológiát a mikromechanikai szerkezetek előállításán kívül apró műanyag alkatrészek fröccsöntéséhez szükséges szerszámok készítésére felhasználják.

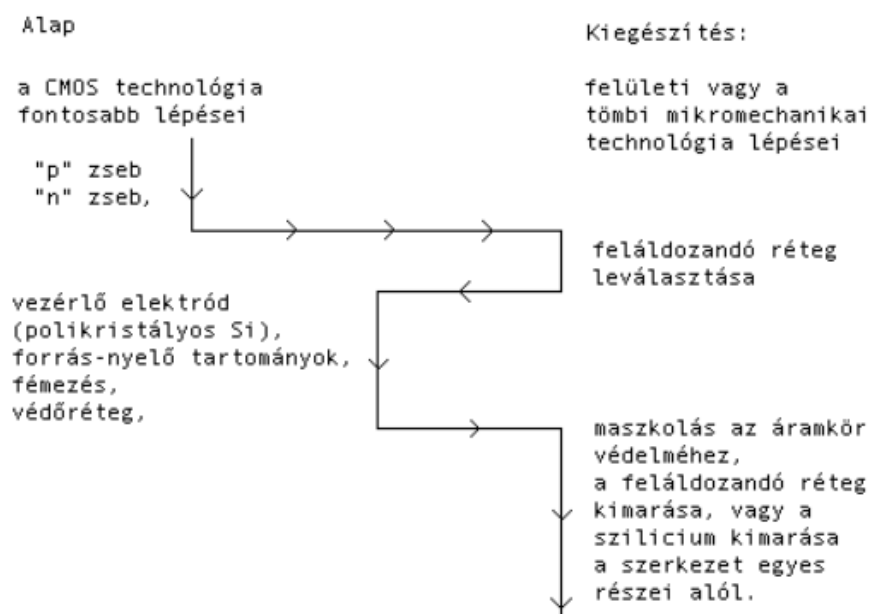
5. Feláldozandó rétegek a mikromechanikában

Széles körben használatos eljárás mozgó alkatrészek előállítására a feláldozandó rétegek alkalmazása. Ez azt jelenti, hogy a rétegszerkezet egyes elemei ideiglenesek, csak azt a célt szolgálják, hogy a véglegesen megmaradó elemek ne tapadjanak egymáshoz. A feláldozandó rétegek alkalmazásának alapfeltétele, hogy ezek szelektíven marhatók legyenek, s a marás ne károsítsa a mikrorendszer már elkészült egyéb elemeit.

Fontos, hogy a megmaradó rétegek, valamint a köztük kémiai úton gőzfázisból leválasztott (CVD) feláldozandó rétegek (pl. foszfor-szilikát üveg) ne tartalmazzanak belső mechanikai feszültségeket. A megmaradó rétegek ugyanis szabadon lebegve, vagy kis részükön befogva deformálódhatnak a belső feszültség hatására.

Feláldozandó réteggént használható porózus vagy polikristályos szilícium, alumínium, szilícium-dioxid, különféle üvegek, mindegyik más összetételű marószerezrel, illetve marási technológiával kezelhető. HF alapú marószerek esetén fotoreziszt maszkolási technika vagy Si_3N_4 védőréteg alkalmazható a megkímélendő területeken.

Komoly nehézségeket okozhat a feláldozandó réteg kimarása után az elmozduló rétegek esetleges összetapadása, különösen nedves marási technikák alkalmazása esetén. Ennek megakadályozására több, különleges szárítási eljárás létezik. A legegyszerűbb az alkoholos öblítés, majd az alkohol gyors elpárologtatása forró felületen. A fagyasztva szárítás során a szerkezetet ciklohexánba kell mártani, majd a hőmérsékletét nitrogén áramban $5\text{ }^\circ\text{C}$ alá csökkenteni. A ciklohexán befagy, majd lassan elszublimál, megfelelő pozícióban hagyva a felületeket.



11. ábra: Mechanikai szerkezetek integrálási lehetőségei CMOS áramkörökhöz

Az előbbieken említett felületi mikromechanikai technológiák közül a LIGA nem illeszkedik a tiszta gyártósorokon futó eljárásokhoz. Tömbi mikromechanika és a mikroelektronika integrálása egyéb nehézségeket is felvet. Egyes alkáli tartalmú marószerek alkalmazása a tiszta gyártóterekben nem megengedhető. A megoldás ilyen esetekben a technológia utólagos alkalmazása (11. ábra, tömbi mikromechanikai technológiák).

6. Fotolitográfia a nanoelektronikában

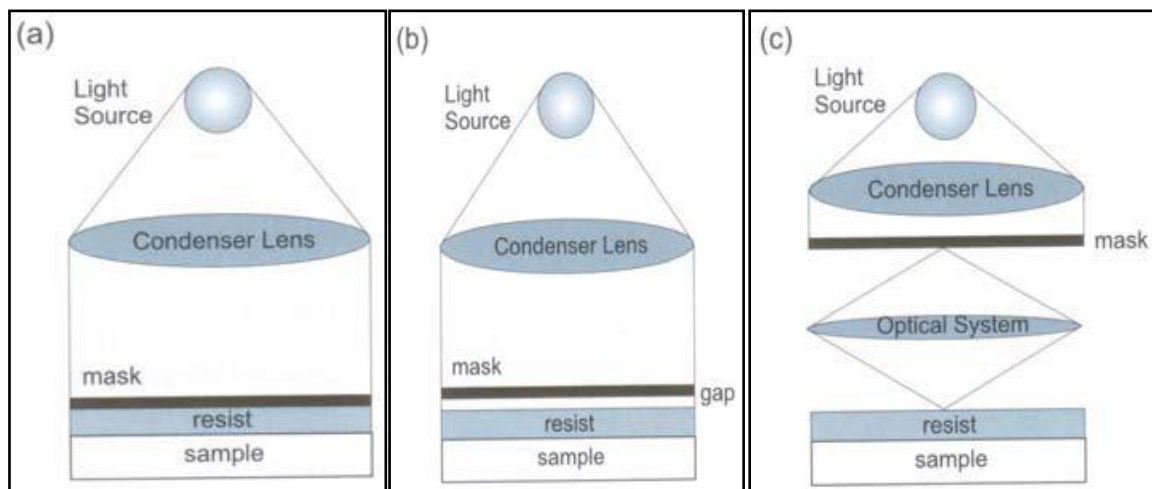
(órán nem volt, vizsgán viszont előfordult)

[3] – 01Fotolitografia.ppt

A fotolitográfia tulajdonképpen minták kialakítását jelenti a Si felületén fény segítségével. A gyártási procedúra legdrágább része azonban a maszkok előállítás, ez a litográfiára is kihatással van. A megvalósítható minimális csíkszélesség 70nm.

Maszkolási módszerek (12. ábra):

- kontakt (a)
- közeli (b)
- vetítés (c)

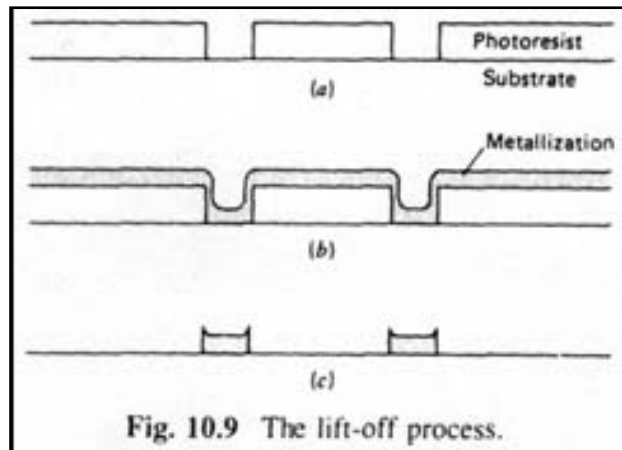


12. ábra: Maszkolási módszerek

Az alkalmazott rezisztet két csoportra oszthatjuk fel: A pozitív reziszt esetén az exponálás roncsolja a rezisztet, azaz a megvilágított rész válik oldhatóvá, a maszk pozitív képe jelenik meg a mintázatban (dark field mask). A negatív reziszt esetében az exponálás megkeményíti a rezisztet, így a megvilágított rész lesz oldhatatlan (light field mask).

A rezisztrel szemben támasztott követelmény, hogy nagy legyen az érzékenysége, így rövidebb expozíció is elegendő, ezáltal a költségek csökkenthetők. Elvárt továbbá a megfelelőkontraszt, azaz csak a világosan megvilágított részek módosulhatnak. Ellent kell továbbá állnia a marásnak is, ezáltal a következő lépést segíti elő. A lift-off alkalmazás érdekében elvárt a profile control ellenállás.

Lift-off: A reziszt felvitele és a minta kialakítása után a rezisztre választjuk le az anyagot, a reziszt eltávolításával együtt a felesleges helyekről az anyag is eltávolítjuk. (13. ábra)



13. ábra: A lift-off folyamat

6.1. Az optikai litográfia korlátai

A minimális alakzat mérete a $\frac{k\lambda}{NA}$ képlettel számítható. A törtben a k egy arányossági tényező, tipikus értéke 0,5 egy diffrakció korlátozott rendszerben. λ a hullámhossz, NA a numerikus apertúra, értéke a $\sin(\alpha)$ értékével egyenlő, ahol 2α a befogadó szög a lencse fókusz pontjában.

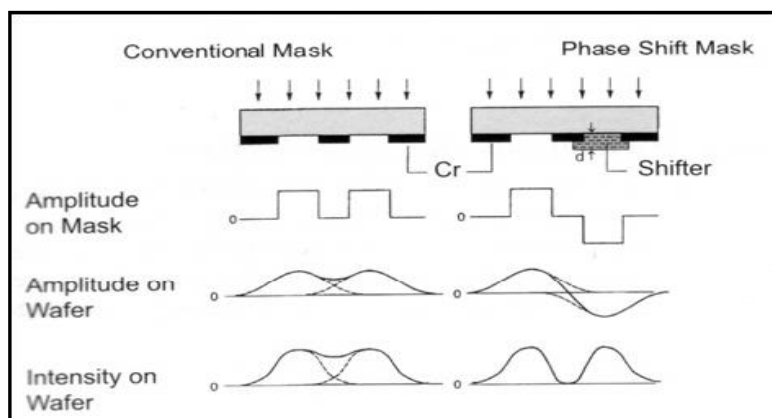
A mélységélesség: $\frac{\lambda}{NA^2} \rightarrow$ fontos, mert a szeletek nem síkok.

A NA növelése nem megoldás, tehát a méretek csökkentéséhez a λ -t kell csökkenteni.

6.2. Méret csökkentési módszerek

6.2.1 Fázistoló maszk

A fázistoló maszkok (14. ábra) alkalmazásával minimalizálhatjuk a diffrakciós hatást, viszont a maszk készítése így bonyolultabb lesz.



14. ábra: Fázistoló maszkolás elve

A beeső és a visszavert foton sugár interferenciája miatt állóhullám alakulhat ki a rezisztben. Reflexió eltemetett átmeneteken is kialakulhat, ami a csíkszélesség függését okozhatja az eltemetett réteg vastagságától. Antireflexiós réteg alkalmazásával sokkal élesebb alakzat-élek keletkeznek.

6.2.2 Extrém UV litográfia (lágymöntgen litográfia)

Az EUV forrása egy szuperszonikus sebességgel táguló Xe gáz klaszterre fókuszált lézerrel generált plazmán alapul, $\lambda \sim 10$ nm.

Alacsony λ esetén az optikai anyagok nagy mértékben abszorbeálnak

- Reflexiós optikák (pl.: Bragg tükrök)
- Vékony, hibamentes maszkok

Pl.: $\lambda = 13$ nm, a tükrök 40–70 nm vastag Mo és Si rétegpárból állnak

EUV segítségével nagy aspect ratio reziszt profilok kialakítása lehetséges, mivel kisebb hullámhosszon kisebb probléma a mélységélesség.

6.2.3 Röntgensugaras litográfia

Hasonlít az optikai litográfiához, azonban az alkalmazott hullámhossz kisebb: 0,1 – 10 nm, de a felbontás $= k(\lambda g)^{1/2}$, ahol g a maszk és a hordozó közötti távolság (a gyártásban 5 – 40 μm), így a felbontás $= 0,07 - 0,2 \mu\text{m}$ $\lambda = 1$ nm esetén. Kontakt nyomtatás esetében 20 nm-es csíkszélesség és nagy aspect ratio érhető el. Párhuzamos folyamat, melyben a reziszttel bevont felületet maszkon keresztül világítják meg, ezért nehezebb a maszk készítése és nagy intenzitású röntgenforrás kell.

Előnyei:

- Nagy mélységélesség
- Kiváló reziszt profilok
- Nagy processz szélesség
- A csíkszélesség független a hordozó topológiájától és típusától
- Relatív immunis a kis atomi tömegű szennyezőkre

Hátrányai:

- 1 maszk technológia (arany 1–2 μm vastag szilíciumon) \rightarrow hibák, aspect ratio, hajlás és melegedés a problémák
- Költséges és/vagy bonyolult forrás
- Illesztés nem triviális

6.2.4 Ionsugaras litográfia

Tipikusan folyékony fém (pl.: gallium) ionokat használnak.

Előnyei:

- Elektronoknál kisebb mértékű szóródás
- Az ionsugár a kezdeti pálya közelében marad \rightarrow nincs szükség dóziszállításra különböző alakzatok vagy hordozók esetén
- Közvetlen fémréteg leválasztás (fókuszált ionsugár) \rightarrow alkalmas maszkok javítására

Hátrányai:

- Az ionok kölcsönhatnak az anyaggal:
 - Ion keveredés
 - Kristályrács amorfizálódik
 - Optikai tulajdonságok módosulnak
 - Nem tervezett adalékolás
 - Sputter maródás
- Az ionok abszorbeálódnak (tipikusan 10 nm-es környezetben)
 - Stencil típusú maszkok
 - Egy gyűrű belseje kiesik, kivéve felbontás alatti rögzítések alkalmazása esetén

6.2.5 Elektron sugaras litográfia

A mintákat közvetlenül az elektron érzékeny rezisztén alakítják ki egy a szeletet sorosan végigpásztázó elektronsugárral. Ritkán használják, leginkább a nagy pontosságú, mester fotomaszkok gyártásához. Kutatásban népszerű, $\lambda = h/(2mE)^{1/2} \rightarrow \lambda = 7.7 \text{ pm}$ 25 keV esetén. Projekciós EBL rendszerek lettek kifejlesztve pl.: SCALPEL (Scattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography)

Előnyei:

- Nagy felbontás \rightarrow egészen 5 nm-ig
- Hasznos tervező eszköz \rightarrow a közvetlen írás gyors minta módosítást tesz lehetővé (nem kell maszk)

Hátrányai:

- Költségek (6 – 10 millió \$ a hardware)
- A közvetlen írásnak kicsi a kapacitása \rightarrow lassú és drága

6.2.6 Lágymű litográfia

Rugalmas bélyegzőket alkalmaznak nanoméretű alakzatokat tartalmazó eszközök gyártásához. Elasztikus bélyegző (a domborműves bélyegző elektronsugaras litográfiás kialakítása költséges, de a minta másolása PDMS bélyegzőkre egyszerű és csekély költségű).

Mikroérintkezéssel történő nyomtatás

- Elasztomer bélyegzőket használnak thiol molekulák felvitelére a felületre, mely általában egy vékony arany vagy ezüst réteg \rightarrow SAM
- egyszerű, közvetlen, költséghatékony, rugalmas
- Két tipikus deformáció elasztomerek esetében:
 - magas struktúrák összetapadása
 - süllyesztett részek lelógása a nyomtatás során

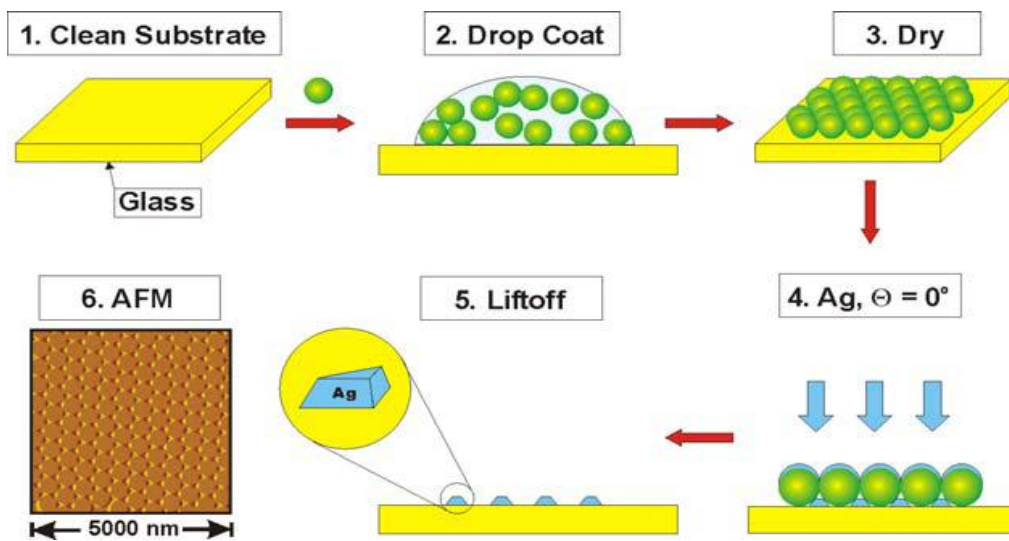
Mikroöntés (micromolding) kapillárisokba: alacsony viszkozitású anyagok helyezése a csatornák nyílásaihoz → a folyadék automatikusan megtölti a csatornát a kapilláris. A kezelés végén az PDMS öntőformát eltávolítják a polimer mikrostruktúráról.

Másolat öntés:

- hatékony módszer az öntőforma másolására
- egy lépésben lehet 3D topológiákat másolni
- a megbízhatóság a nedvesítés és a kitöltés függvénye

6.2.7 Nanogolyós litográfia

(15. ábra)



15. ábra: Nanogolyós litográfia