

"There is plenty of room at the bottom."
(Odalenn rengeteg hely van.)
R. P. Feynman

Mizsei János

Integrált mikrorendszerek

1. Bevezetés

Az integrált mikrorendszer olyan, mikroelektronikai technológiákkal létrehozott, nagymértékben kompakt rendszer, melynek működésében alapvető szerepe van annak, hogy elemei igen kis méretűek és egymással szoros (elektromos, termikus, mechanikai, optikai, mágneses, kémiai) csatolásban vannak.

Integrált mikrorendszerek az elterjedten használt integrált áramkörök is. Ezekben az elemek közötti elektromos csatolás a jellemző, de egyéb kölcsönhatások sem hanyagolhatók el, mert egyes esetekben hatásuk döntően befolyásolhatja az áramkör tulajdonságait. Az előbbi definícióból látható azonban, hogy az integrált mikroáramkör kategória az integrált mikrorendszer kategória eleme.

Az integrált mikrorendszerek fejlődése igen gyors, s bár még sok területen csak laboratóriumi kísérletek és eredmények léteznek, mégis igen sok célra készítenek ilyen eszközöket.

A fejlődés jelenlegi állapotában a különféle mikroérzékelők és beavatkozók adják az integrált mikrorendszer kategória elemeinek többségét, de integrált mikrorendszer az elektronikában széleskörűen alkalmazott optocsatoló is.

2. Mikromechanika

2.1 Bevezetés

Az utóbbi évtizedek mikroelektronikai forradalma egyértelműen a szilícium és vegyületei kiváló villamos és technológiai tulajdonságain alapul. Ezek a tulajdonságok, mint a könnyű oxidálhatóság, az oxid kiváló villamos és mechanikai jellemzői, jó megmunkálási lehetőségek nedves és száraz kémiai eljárásokkal, tették lehetővé a planártechnológia kifejlesztését. Ez az integrált áramkörök gyártására alkalmas eljárás alapján véve felületi (2 dimenziós) technológia.

Az egykristályoknak nemcsak az elektronikai, hanem a mechanikai tulajdonságaik is kiválóak. Nagy húzószilárdság, nyomószilárdság jellemzi ezeket az anyagokat. Tartós és ismételt igénybevétel esetén sincs szerkezeti illetve szilárdsági változás, vagyis rugalmatlan alakváltozás és fáradás sem lép fel.

A Si különösen kitűnik azzal, hogy keményebb, mint a legtöbb fém. Gépelemként, műszerek mechanikai elemeként való felhasználásának (3 dimenziós technológia) sokáig akadálya volt ridegsége, ezáltal a hagyományos mechanikai technológiák alkalmazhatatlansága.

Változott a helyzet az anizotrop marás lehetőségének felismerésével. Ez azt jelenti, hogy léteznek olyan szerves és szervetlen vegyszerek, melyek a szilíciumot oly módon oldják, hogy az oldódás sebessége a kristálytani irány függvénye. Az ilyen marószerek alkalmazásával, valamint újabban a plazmában végrehajtott száraz marással lehetséges térbeli alakzatok kialakítása. Így lehetőség van mechanikai gépelemek, sőt gépek előállítására a

mikroelektronikai eszközökkel megegyező méretben is. Ezt a rendkívül finom technológiát nevezzük mikromechánikának (angol neve Micromachining). Izotrop vagyis irányfüggetlen és anizotrop marás kombinálásával elvileg tetszőleges alakú háromdimenziós alakzat hozható létre.

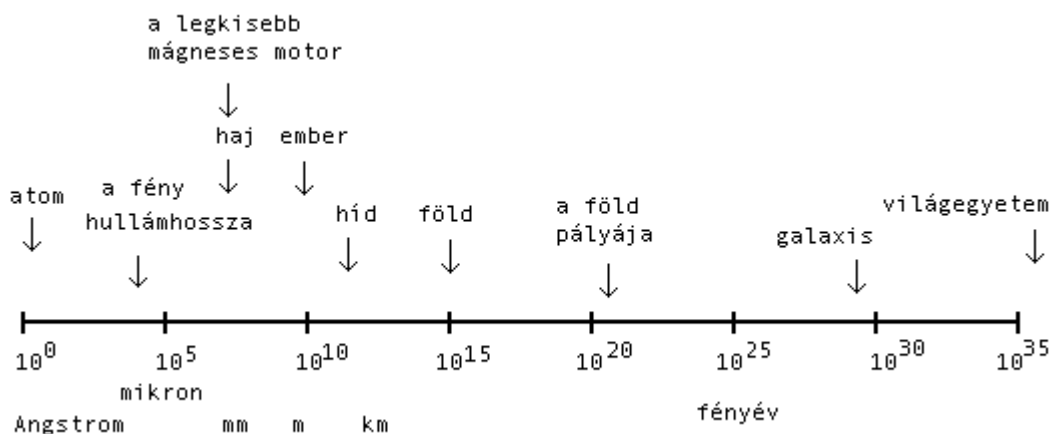
Az elmúlt néhány évtizedben az elektronikus alkatrészek méretei a cm-es tartományból a mikrométeres méretek tartományába csökkentek. Jelenleg hasonló forradalmi változások vannak a mechanikai alkatrészek tekintetében.

A mikromechanikai rendszerek előnyei a következők:

- (a) Nagyobb teljesítmény. Minthogy a rendszer működéséhez szükséges idő a rendszer lineáris méreteivel arányosan nő, a tizedére kicsinyített rendszer sebessége tízszeresére nőhet.
- (b) Nagyobb pontosság. A hőmérséklet hatására bekövetkező torzulások, méretváltozások, a mechanikai rezgések zavaró hatása a méretcsökkentés következtében egyre kisebb jelentőségű.
- (c) A kis erőhatások és a kis tömegek egyre finomabb rendszerek építését teszik lehetővé. A kis tömeg űrtechnikai alkalmazások esetén döntő jelentőségű lehet.
- (d) Nagyobb hatások. Az anyagköltségek a méretek harmadik hatványával (a térfogattal) arányosak, a kisméretű rendszerek nagyon drága, de nagyon jó tulajdonságú, különleges anyagokból is viszonylag olcsón felépíthetők. Az anyag megválasztásának ez a szabadsága lehetőséget ad a tervezőnek a hatások növelésére.
- (e) Helytakarékosság. A korszerű gyártórendszerekkel kapcsolatos megfontolásokban fontos tényező az alapterület és költségei. A kis rendszerek beépítése csökkenti ezeket a költségeket.

Egy elektronikából vett példa a fentiek szemléltetésére: diszkrét alkatrészeket meglehetősen drága lenne arany huzalokkal csatlakoztatni egymáshoz. Integrált áramkörökben az arany vezeték alkalmazása teljesen megszokott, és az erre a célra felhasznált arany értéke elhanyagolhatóan kicsi. Ugyanakkor az integrált áramkörök sebessége már csak annak köszönhetően is nő, hogy az egyes alkatélemek közelebb vannak egymáshoz. Hasonló hatása lehet a méretcsökkentésnek a mikromechanikai rendszerek alkalmazásában.

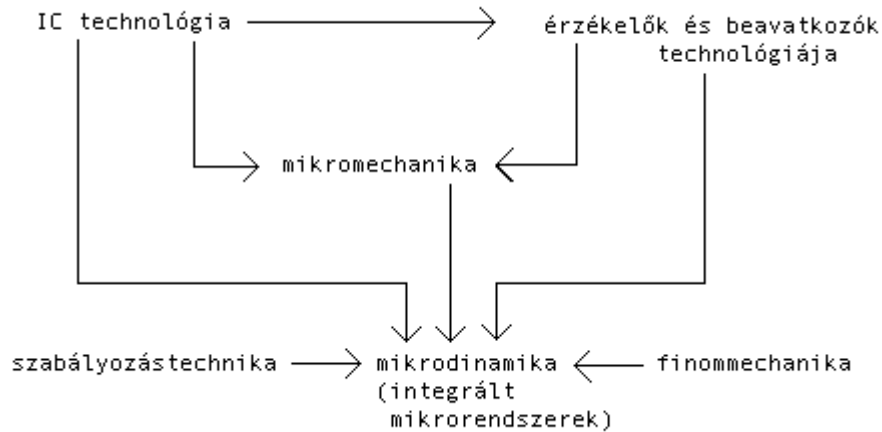
A méretcsökkentés és a mechanikai tulajdonságok összefüggésére jó példa az egyik legújabb felületvizsgáló berendezés a pásztázó alagút mikroszkóp. Megvalósítását alapvetően az tette lehetővé, hogy a konstruktőrök felismerték: a pásztázó rendszert kis méretben elkészítve a zavaró rezgések kiküszöbölhetők. Ennek alapja az, hogy a kisméretű rendszerek rezonancia frekvenciái olyan sávba esnek (ultrahang), amely eltér a környezetből származó zavarok frekvencia sávjától.



1.a. ábra. A mechanikai objektumok logaritmus méretskálája

(M) sem tudja láthatóvá tenni. Az atomi méretekben megvalósított rendszerek pásztázó elektronmikroszkópiával (PEM), transzmissziós elektronmikroszkópiával (TEM), esetleg pásztázó alagútmikroszkópiával (STM), vagy atomerő mikroszkópiával (AFM) vizsgálhatók.

A 2. ábra mutatja a mikromechanika viszonyát a kapcsolódó tudományterületekhez, technológiákhoz.



2.ábra. A mikromechanika és a kapcsolódó szakterületek viszonya

Az apró, integrált mechanikai rendszerek alkalmazási lehetőségei kitérítik a szereléstechológia korlátait. Az új elektronikai generáció sokkal több összeköttetést igényel, az alkatrészeket egyre közelebb kell elhelyezni egymáshoz a terjedési idők csökkentéséhez, valamint egyre kisebb méretű alkatrészeket és kötési felületeket kell alkalmazni a kapacitások csökkentése céljából. Kézenfekvő a gondolat, hogy a kisméretű alkatrészek kisméretű robotokkal szerelhetők. Sok elektronikai szerelési művelet egy csészealjnyi területen megoldható lenne a megfelelő méretű szerelőrobottal. Természetesen a kisméretű szerelőrobot szereléséhez szintén kisméretű szerelőrobot szükséges.

A mikromechanika legelső alkalmazása érzékelők és beavatkozók területe volt (egyik végén befogott rezgő lemez, gyorsulásmérő, rezgésérzékelő, termikusan vezérelt lehajló lemez). Későbbi alkalmazásokban fogaskerekek, fogaskerekes és membrános szivattyúk, szelepek, tintakilövő nyomtatók, fluid erősítő, ultrahang átalakító, mikrofon, mikroszipesz, hőemitter mátrix, elektrosztatikus mikromotor készültek ily módon.

Az orvostudományban a testbe ültethető operáló, vagy egyéb célú robotok kis mérete, az űrkutatásban a mikromechanikai rendszerek kis tömege nyithat - a szó szoros értelmében is - új távlatokat. A lehetőségeket azok fogják csak igazán fölmérni, akik most kezdenek foglalkozni a témakörrel.

Igen lényeges tényező a mechanikai rendszerek fejlesztőinek, tervezőinek szemlélete. A hagyományos technológiákkal megvalósítható mechanikai mikroszerkezetek csúcsteljesítménye a karóra már többszáz éves konstrukció. Ezt túlszárnyalni eddig több oknál fogva nem sikerült. Az első legfőbb ok, hogy a mechanikai szerkezetek közvetlen ember-gép kapcsolat esetén csak az emberi méretekkel összemérhető megvalósításban válnak kezelhetővé. A további okok gazdasági illetve technológiai természetűek. A hagyományos mechanikai szerkezetek további kicsinyítése nem jár lényeges gazdasági előnyökkel, s az elterjedten használt gépészeti technológiai módszerekkel egyébként is lehetetlen. A közvetlen ember-gép kapcsolat szükségtelessé válása (automatizálás, robottechnika) és a mikroelektronikai technológiák bevonása a mechanikai rendszerek megvalósításába ezt a helyzetet lényegesen megváltoztatja, s ehhez kell alkalmazkodnia a fejlesztői szemléletnek is.

2.2. Elméleti megalapozás: a méretcsökkentés következményei

A méretcsökkentés hatásának feltárásához meg kell vizsgálni a különféle erők (tehetetlenségi erő, elektrosztatikus és elektromágneses erők, gravitáció) és a különféle áramsűrűségek (elektromos áram, hőáram, anyagáram, elmozdulás) kapcsolatát, az energia és teljesítményviszonyokat, illetve az előbbieken felsorolt mennyiségek viselkedését arányos kicsinyítés esetére. A vizsgálatok elvégzése arra is választ ad, hogy a méretcsökkentés milyen változók tekintetében jár előnyös hatással.

Az első lépés annak eldöntése, hogy milyen erők szükségesek a rendszer működéséhez. Az eredmények szemléltetésére alkalmas formalizmus egyszerre több, különböző eset megoldását egyszerű alakban foglalja össze. A rendszer lineáris méretét s jelöli. Megválasztása önkényes lehet, lényeg az, hogy a jellemző méret megválasztása után a méretcsökkentés az összes méretre egyaránt vonatkozik. Az

$$F = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ s^3 \\ s^4 \end{bmatrix}$$

egyenlet négy, különféle lehetőséget szemléltet az erőtörvény viselkedésére a méretcsökkenéssel szemben (itt az oszlopvektort csak mint egy rövidített, az áttekintést segítő, összefoglaló írásmódot használva).

Az erő $[s^1]$ szerint változik, vagyis az erőhatás a rendszer lineáris méreteivel arányos a felületi feszültséggel (vonal mentén ható erő) és az elektrosztatikus erőkkel működő rendszerekben ($E=[s^{-0.5}]$ feltétel mellett, vagyis ha a csökkenő méretek növekvő térerővel járnak együtt). Igen gyakori az $F=[s^2]$ törvényszerűség. Ez érvényesül a felülettel arányos erőkre (nyomás, biológiai erők, ahol az izomkeresztmetszet a meghatározó tényező, elektrosztatikus erőkre az $E=[s^0]$ feltétel mellett, vagyis a mérettől független térerő feltételezésével, mágneses erőkre a $J=[s^{-1}]$ feltétel mellett, amely a tekercs belseje és a környezet közötti állandó hőmérsékletkülönbség követelményéhez tartozik). Az $F=[s^3]$ eset a mágneses erőhatásra érvényes, a $J=[s^{-0.5}]$ feltétel mellett, amely a tekercs felületén kialakuló hőáram állandó értéken való tartásából adódik. Végül állandó elektromos áramsűrűséget feltételezve ($J=[s^0]$) a mágneses erő $F=[s^4]$ szerint változik a méret csökkentésével. Alapvetően ez a legutóbbi összefüggés világít rá annak okára, hogy a mikrorendszerekben a mágneses erőkkel való mozgatás jelentősége kisebb, a nagy rendszerekben (erőművek generátorai) pedig az elektrosztatikus kölcsönhatások hanyagolhatók el.

A körülményektől függően további megfontolásokra lehet szükség, ha egyéb korlátozó tényezők is fellépnek, vagy egyes korlátozó tényezőknél enyhébb feltételek is elegendőek. Vékonyrétegekben például a hőfejlődés mellett az elektromigráció (elektron-szél) jelensége is korlátozhatja az áramsűrűséget. A szupravezetők esetleges alkalmazása pedig csökkentheti az áramsűrűséggel kapcsolatos nehézségeket.

Minthogy a tárgyak tömege s^3 szerint változik, ezért a gyorsulásra

$$a = F / m = \begin{bmatrix} s^{-2} \\ \frac{s^{-1}}{s^0} \\ \frac{s^1}{s^1} \end{bmatrix},$$

a mozgás véghezviteléhez szükséges időre

$$t = (2x / a) = \begin{bmatrix} s^{1,5} \\ \frac{s^1}{s^{0,5}} \\ \frac{s^0}{s^0} \end{bmatrix}$$

összefüggés sorozat adódik. Még a legrosszabb, $F=[s^4]$ erőtvény esetére is változatlan marad a mozgás végrehajtáshoz szükséges idő. Négyzetes erőtvény esetére ez az idő arányosan csökken a lineáris méretek csökkentésével. A kis méret tehát a sebesség megnövekedését eredményezi. Minthogy a tehetetlenségi erők egyre kisebbek, sok esetben a feladat dinamikai megközelítése kinematikai megközelítéssel váltható fel, ami új szabályozástechnikai elvekhez vezethet.

Igen fontos a méretcsökkentés hatása a teljesítményviszonyokra, illetve a térfogategységben felszabaduló teljesítményre. Az előbbi írásmódot használva a teljesítmény a megfelelő sorok kitevőinek összegeként adódik:

$$P = Fx / t = \begin{bmatrix} \frac{s^1}{s^2} \\ \frac{s^2}{s^3} \\ \frac{s^3}{s^4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{s^1}{s^1} \\ \frac{s^1}{s^1} \\ \frac{s^1}{s^1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{s^{-1,5}}{s^{-1}} \\ \frac{s^{-1}}{s^{-0,5}} \\ \frac{s^0}{s^0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s^{0,5}}{s^2} \\ \frac{s^2}{s^{3,5}} \\ \frac{s^5}{s^5} \end{bmatrix},$$

a teljesítmény sűrűsége pedig ($V=[s^3]$)

$$P / V = \begin{bmatrix} \frac{s^{-2,5}}{s^{-1}} \\ \frac{s^{-1}}{s^{0,5}} \\ \frac{s^2}{s^2} \end{bmatrix}.$$

2.3. Technológiai alapok

A mikromechanikai rendszerek tényleges megvalósításához az alapot az a technológiai fejlődés adta, amit a mikroelektronika igényei kényszerítettek ki. A mikromechanikai elemek technológiájának illeszkednie kell a mikroelektronikai elemek technológiájához, hogy egyszerre legyenek megvalósíthatók az elektromechanikai rendszerek.

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 elemhármass igazán jól három polikristályos szilícium réteg leválasztásával oldható meg.

Az egykristályos szilícium hordozó megmunkálási technológiai 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, préseléssel egybekötve, anódos kötés).

Végül célszerű megegyezően összefoglalva áttekinteni, hogy mi az oka a szilícium hordozó különleges szerepének a mikromechanika területén. Az, hogy a félvezető iparba befektetett óriási anyagi és szellemi erőfeszítések ne csak a mikroelektronika területén kamatozzanak csak az egyik ok. Valójában, hasonlóan a szilícium mikroelektronikára nézve kedvező elektromos tulajdonságaihoz, a mechanikai (ld. 1. táblázat) és termikus tulajdonságai (ld. 2. táblázat) is igen kedvezőek.

Sűrűsége kisebb, mint az alumíniumé, egyes mechanikai tulajdonságai mégis az acéléhoz állnak közel. Igen kicsi a hőtágulási együtthatója, tehát stabil szerkezetek készítésére alkalmas. Az elektromos és mechanikai elemek integrálhatósága, valamint a technológiai lehetőségek (egészen az atomosan sík felületek megvalósításáig) olyan további előnyök, amelyeket nehéz lenne felülmúlni.

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. Si₃N₄ vagy SiC bevonat alkalmazása előnyös. Végül, mint az a mikrorendszerek technológiájában általános, lehetőség szerint alacsony hőmérsékletű technológiákat kell használni.

Anyag	Sűrűség g/cm ³	Rugalmassági Modulus 10 ¹¹ N/m ²	Szilárdság 10 ⁹ N/m ²	Keménység (Knoop) kg/mm ²
Gyémánt	3.5	10.35	53	7000
SiC	3.2	7	21	2480
SiO ₂	2.27	0.73	8.4	
Si ₃ N ₄	3.1	3.85	14	3486
Si	2.3	1.9	7	850
Fe	7.8	1.96	12.6	400
Acél	7.9	2	2.1	660
W	19.3	4.1	4	485
Mo	10.3	3.43	2.1	275
Al	2.7	0.7	0.17	130

1. táblázat. A mikromechanikai alkalmazások szempontjából fontos anyagok mechanikai jellemzői

Anyag	Hővezetés W/cmK	Hőtágulás $10^{-6}/K$	Olvadáspont °C
Gyémánt	20	1	800, elég
SiC	3.5	3.3	1400, elég
SiO ₂		0.5	1610
Si ₃ N ₄	0.19	0.8	1900
Si	1.57	2.33	1415
Fe	0.8	12	1528
Acél	0.33	17.3	~1500
W	1.78	4.5	3400
Mo	1.38	5	2622
Al	2.36	25	660

2. táblázat. A mikromechanikai alkalmazások szempontjából fontos anyagok termikus jellemzői

Az 1-2. táblázatokban a szilíciumon kívül több olyan anyag is szerepel, amely a mikromechanikai alkalmazásokban várhatóan fontos lesz. Ezek közül ki kell emelni a gyémántot és a szilícium vegyületeit. A gyémánt előállítására mikroelektronikai technológiákkal is sor kerülhet, s ha mindennapi alkalmazása túl költséges is, egyes célokra különleges tulajdonságai következtében hamarosan versenyképessé válik.

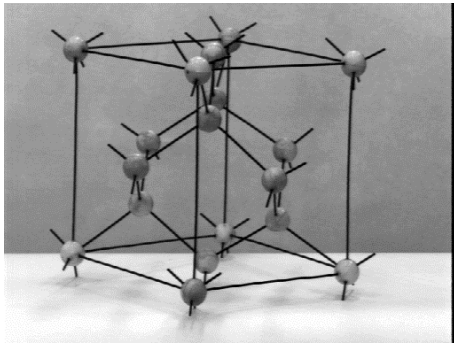
2.3.1. Szilícium egykristályok szelektív, anizotróp marása

A marási technológia szelektivitása azt jelenti, hogy az egyes megmunkálandó tartományokban a marási sebesség lényegesen eltérő. A szelektivitás megkönnyíti és pontosabbá teszi adott mennyiségű anyag eltávolítását. Szelektivitás hiányában a marási folyamat technológiai paramétereit sokkal pontosabban kell tartani, s még így is nehéz kellő reprodukálhatósággal dolgozni. A marási sebesség eltérésének különböző okai lehetnek (eltérő anyagok, szilícium esetén eltérő adalékolás).

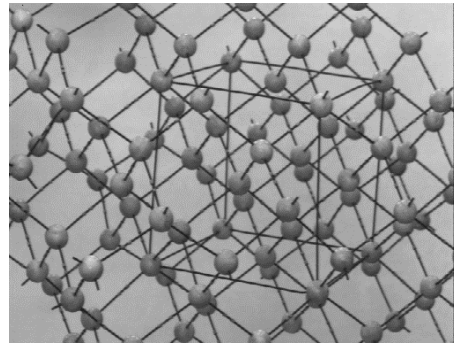
Az anizotrópia a marási sebesség irányfüggésének következménye. Az irányfüggés oka lehet az, hogy egykristályos anyagokban a különféle kristálysíkokban a rácsatomok sűrűsége nem azonos. Példa erre a Si egykristály. Ebben a legnagyobb az atomsűrűség az <111> sík felől nézve, tehát ebből az irányból legkisebb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

A kristálytani irányoktól függő marási eljárások tárgyalásához célszerű áttekinteni a szilícium egykristály szerkezetének jellegzetességeit: elemi cellája egy felületen középpontos, köbös szerkezet, amelybe egy hasonló szerkezet van beleágyazva a testátló irányában 1/4 rácsállandóval eltolva. Ez a gyémántrács, ennek köszönhetőek a szilícium kiváló mechanikai

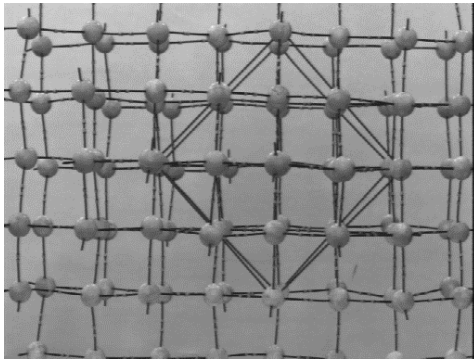
tulajdonságai. Az elemi cellát és a kristályszerkezet képét különféle kristálytani indexű irányokból a 3. ábra mutatja.



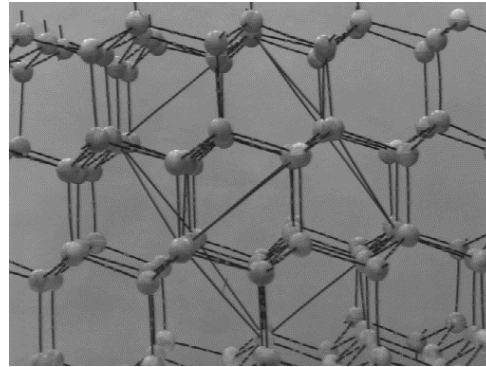
Elemi cella



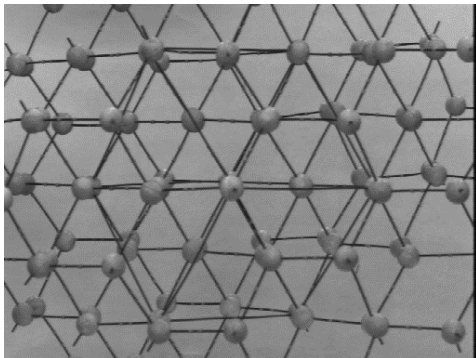
ebből a szögből a rács rendezetlennek tűnik



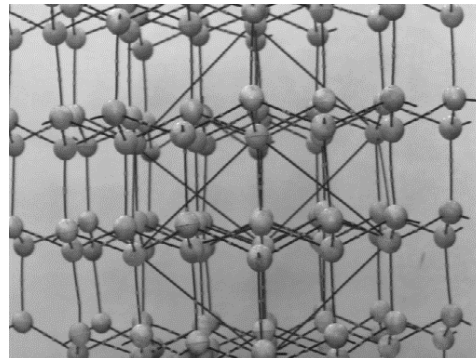
<100>



<110>



<111>



<112>

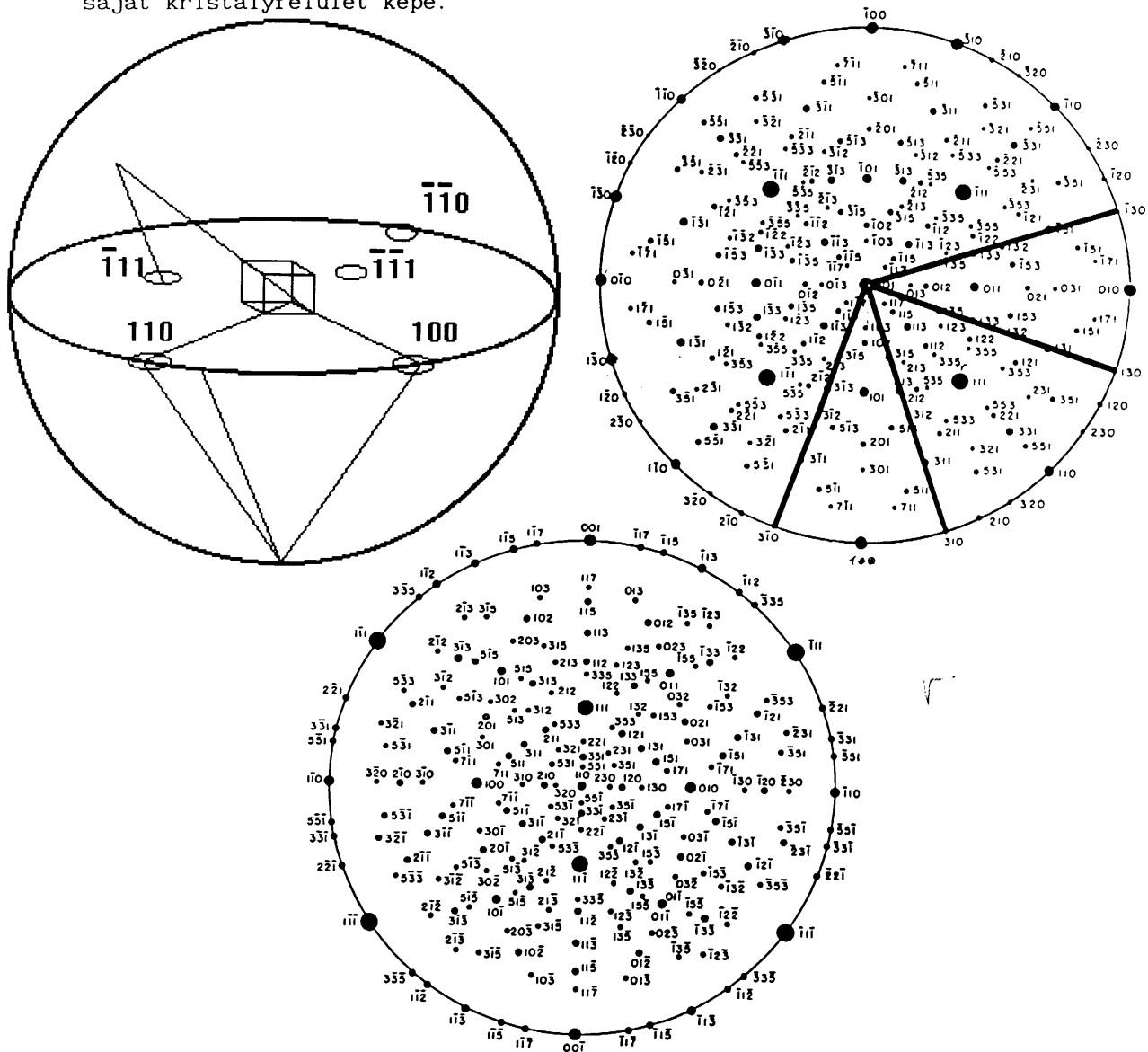
3. ábra. A szilícium kristályrácsa az elemi cellával

Az egyes kristálytani irányok, illetve síkok egy körlapon is ábrázolhatók sztereografikus projekcióval (4. ábra). Az ábrázolás lényege, hogy a kristályt egy gömb egyenlítői síkján a gömb középpontjába kell helyezni. Az ábrázolandó síkok normálisai, illetve az ábrázolni kívánt irányoknak megfelelő egyenesek gömbbel való dőféspontját a gömb déli pólusával összekötve az összekötő egyenes az egyenlítői síkot metszi. Ez a

metszéspont lesz a megfelelő irány, illetve sík képe.

Ugyanazon főkörökre eső síkok a vetületben is azonos körre esnek. A főkörök a vetületen koncentrikusan helyezkednek el, a vetítés azonos főkörökön belül szögtartó. A vetítés alapkörére merőleges körökhöz rendelhető síkok képei egyenesekre esnek. Az alapkör közepére esik a

saját kristályfelület képe.

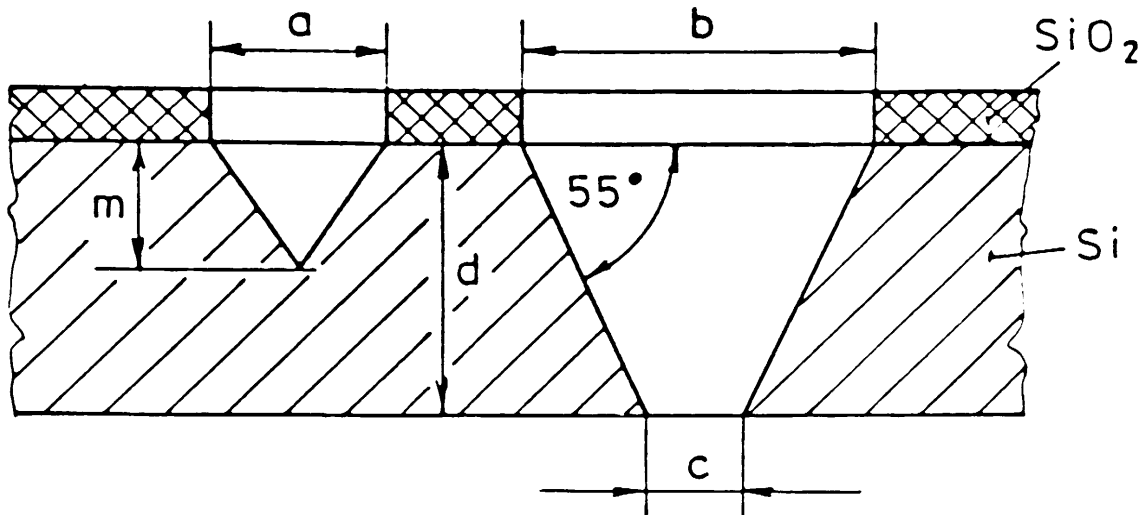


4. ábra. A sztereografikus projekció $\langle 100 \rangle$, és a kristálysíkok képei $\langle 100 \rangle$, valamint $\langle 110 \rangle$ orientációjú gyémántrácsról

Egyes szervetlen lúgok (NaOH, KOH) tömény vizes oldatai, 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.

Az $\langle 100 \rangle$ szelet felületét négy $\langle 111 \rangle$ orientációjú sík metszi, melyek egy oktaéder négy oldalát alkotják és $54,74^\circ$ -os szöget zárnak be az $\langle 100 \rangle$ lappal. A marási idom az 5. ábra szerint alakul, ha a maszk élei egybeesnek a felület és az $\langle 111 \rangle$ orientációjú síkok

metszésvonalával.



5. ábra. Anizotróp marással készített gödör geometriája

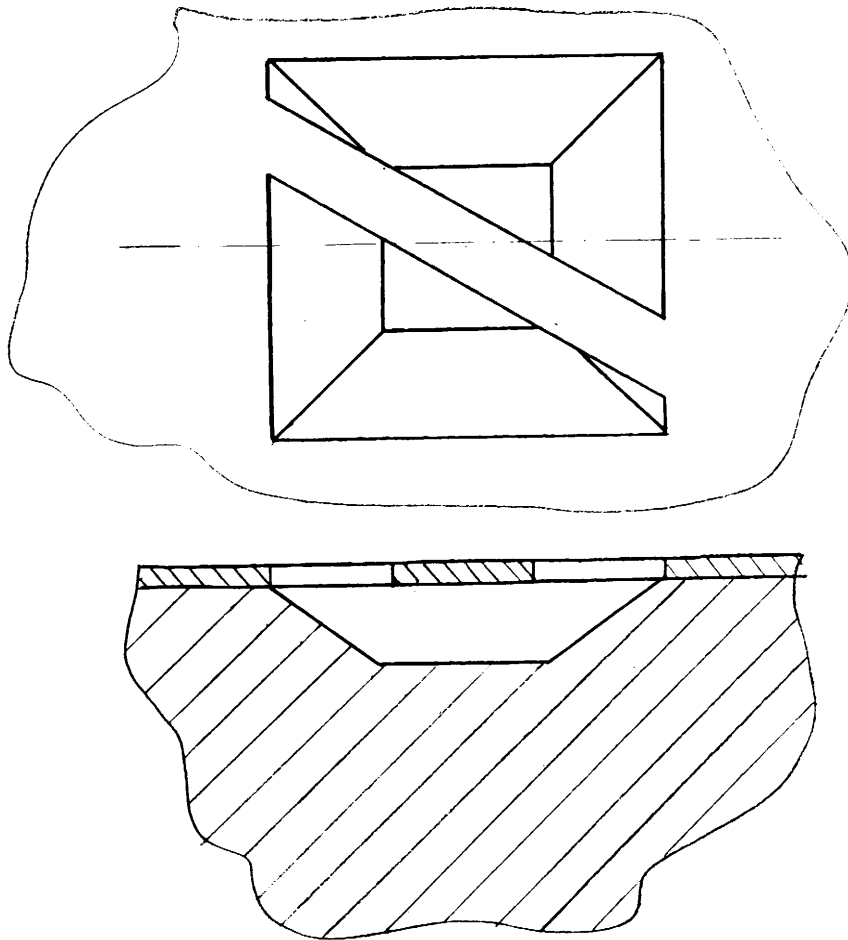
A piramis formájú gödör mérete

$$m = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

Az ábra baloldali részén levő piramis marása az m mélység elérése után gyakorlatilag befejeződik, mivel az oldallapok csak nagyon lassan maródnak. A jobboldali részén pedig egy c élhosszúságú négyzetes lyuk keletkezik, ahol

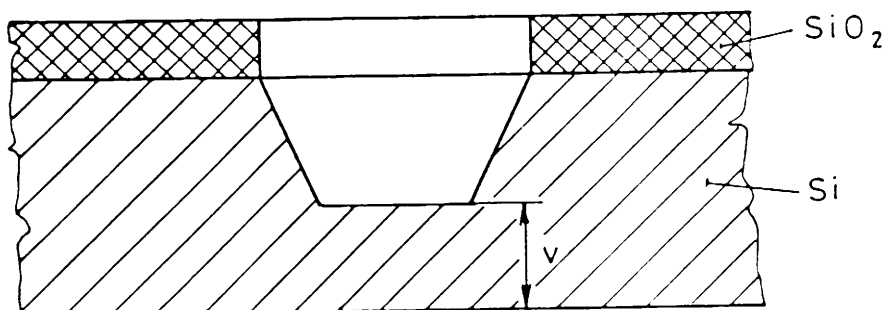
$$c = b - \sqrt{2} d .$$

Az $\langle 100 \rangle$ orientációjú szelet maratásakor az $\langle 111 \rangle$ síkok a maró felület a $[011]$ irányokban metszik. Ha a maszk élek az említett irányokkal nem párhuzamosak, akkor a maszk alatt is elindul a marás, míg elő nem áll a helyes irányítottágú négyzet. Ezt a jelenséget is fel lehet használni a technológia során: a védőrétegből igen vékony membrán, áthidalás vagy konzol készíthető az alatta elhelyezkedő szilícium eltávolításával (6. ábra).



6. ábra. Áthidalás készítése anizotróp alámarással, kihasználva a maszk egyes éleinek elorientálását

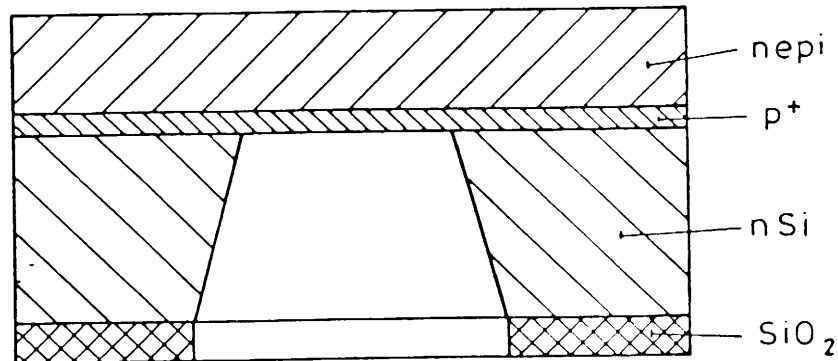
Mikromechanikai alkatatok készítése során gyakran előfordul, hogy adott vastagságú membrán készítése a cél (7. ábra). Ebben az esetben a marást szigorú feltételekkel (stabil áramlási feltételek és pH-érték, hőmérséklet, marási idő) kellene elvégezni. Ez igen nehéz művelet és a pontos méretek sem tarthatók, különösen néhány μm vastag membránok esetén.



7. ábra. Membrán készítése anizotróp marással

A bórral erősen adalékolt ($N > 7 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$) "p" típusú szilícium marása igen lassú, az ilyen réteggel a marás leállítható. A marási stop felhasználásához "n" típusú, néhány ohm cm

fajlagos ellenállású szeletből kell kiindulni. Az aktív membrán felőli oldalon bór imlantációval 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 kimarható (8.ábra).



8. 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.

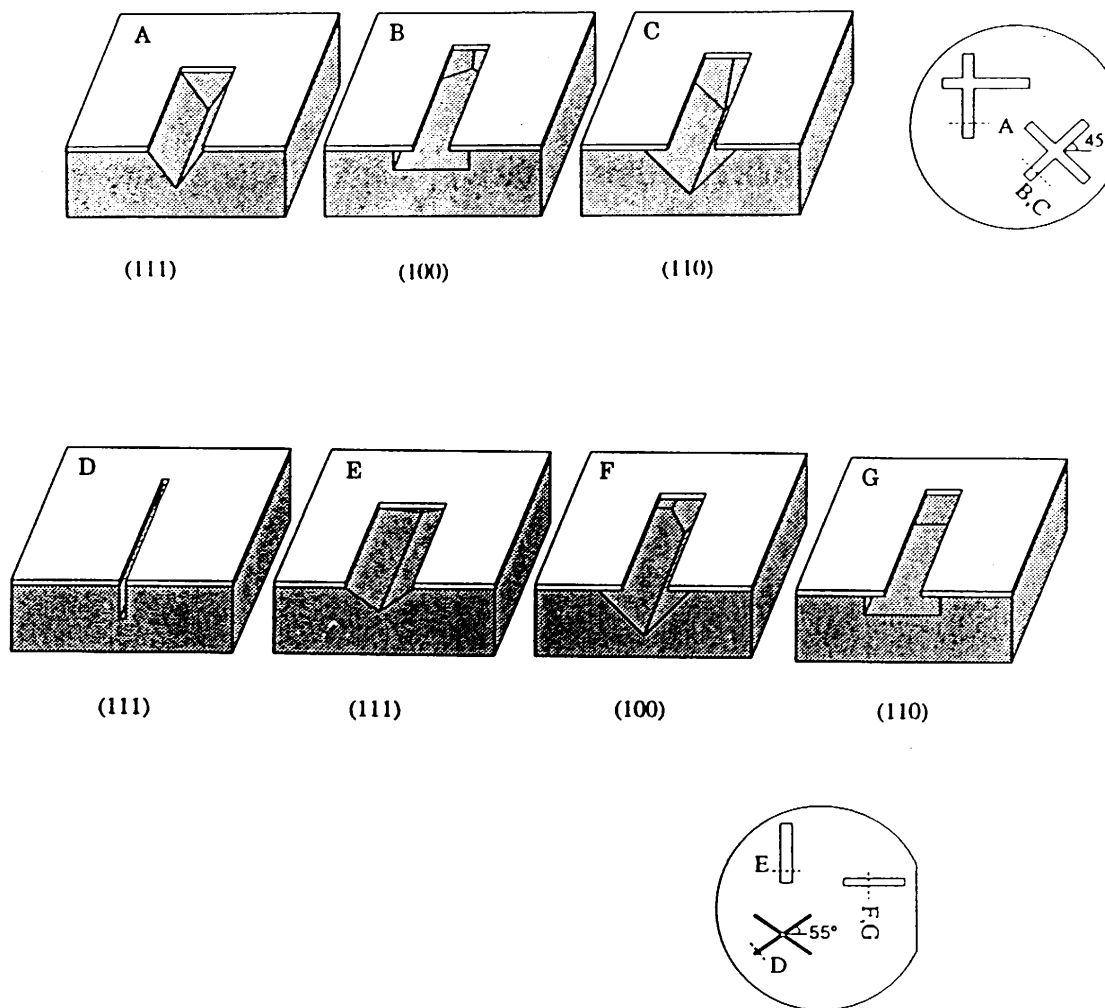
A 3.táblázat foglalja össze a leggyakrabban használt izotróp és anizotróp marók tulajdonságait.

Marószer	Hőmérséklet °C	Anizotrópia <100>:<111>	Marási seb. μm/perc	Marás Leáll.	Maszk réteg
HF+HNO ₃ + Ecetsav	25	1:1	~3	n=p<10 ¹⁸	SiO ₂
HF elektro- kémiai	25	1:1	Áramsűrűség függvénye	n=p<10 ¹⁶	Reziszt Si ₃ N ₄
NaOH~KOH	50-100	400:1	~4	P ⁺ >7.10 ¹⁹	SiO ₂ Si ₃ N ₄
NaOH~KOH Elektr. Kém.	50-100	400:1	~4	p-n átmenet	SiO ₂ Si ₃ N ₄
EDP	60-100	50:1	~1	P ⁺ >7.10 ¹⁹	SiO ₂ Si ₃ N ₄ Au
TMAH		300:1			SiO ₂ Si ₃ N ₄
Hidrazin		16:1			SiO ₂ Si ₃ N ₄ fémek

3.táblázat. Irányfüggő (anizotróp) és izotróp marószerke a tömb szilícium megmunkálásához (TMAH: tetrametil-ammónium hidroxid)

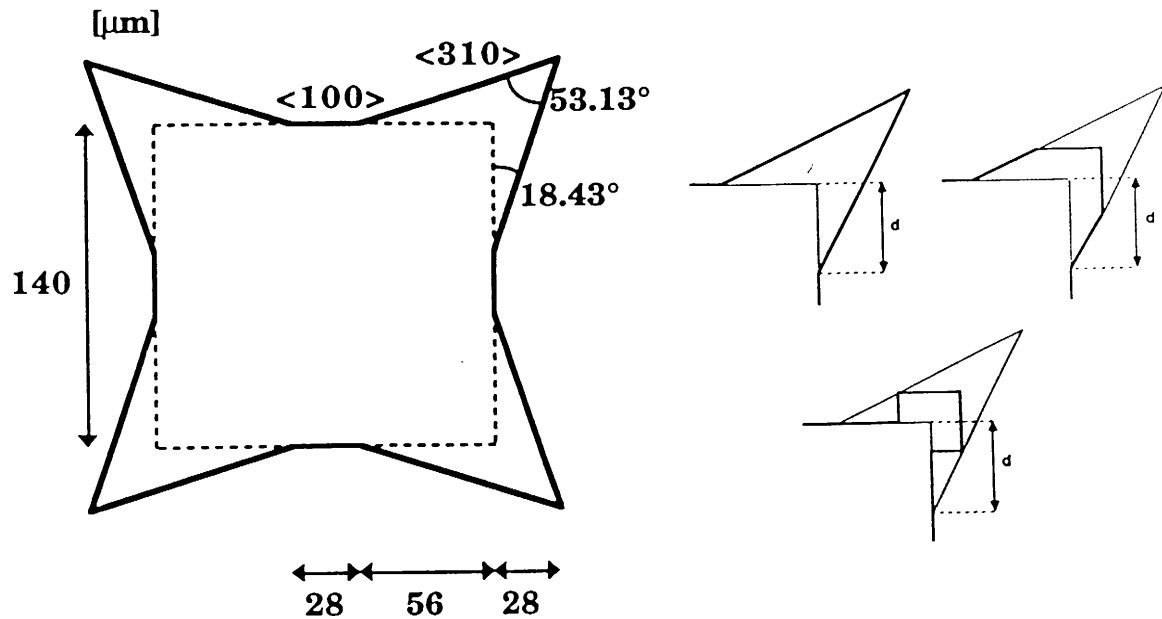
A táblázatban található anizotróp marási technikák széles választékából mindig az adott feltételeknek legjobban megfelelőt kell kiválasztani. A kiválasztás szempontjai: technológiai illeszkedés, a rendelkezésre álló maszk anyag és a szerkezet konstrukciójához illeszkedő marási stop technika.

A különböző orientációjú hordozókon a maszk élének irányától és a marószertől függően tehát változatos geometriájú "V" és "U" bemarások készíthetők. Ezeket foglalja össze a 9. ábrásorozat.



9. ábra. "V" és "U" bemarások $\langle 111 \rangle$ (A, B, C) és $\langle 110 \rangle$ orientációjú felületeken (D, E, F,). A tiszta KOH oldat alkalmazása (110) lapokkal határolt idomokat eredményez (C, G ábrák).

Az irányfüggő marási technikák alkalmazása során a jól illesztett maszk élék 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 (10. ábra).



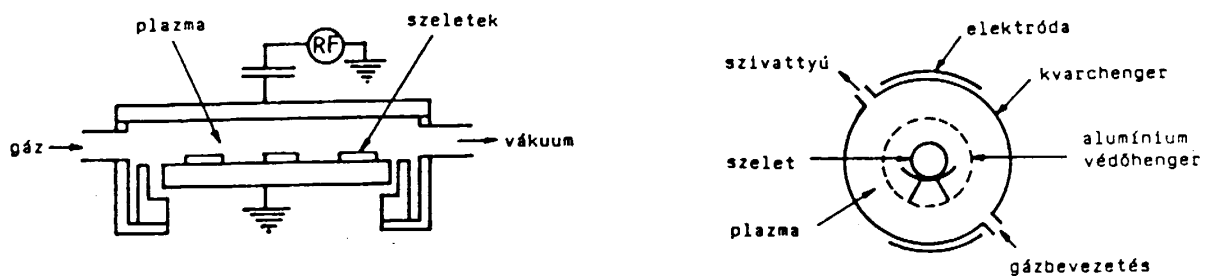
12. ábra. Kompenzált maszkok a sarok környéki alámarások csökkentésére

A marási folyamat elektrokémiai úton is leállítható. Az "n", illetve "p" adalékolású szilíciumra ugyanis különbözőek a passzivációs potenciálok. Az elektrolitikus marás során úgy lehet beállítani a külső feszültségeket, hogy az "n" adalékolású szilícium szelektíven oldódjon. Az elektrokémiai marásra szolgáló berendezésben a szilícium anódos oxidációja is végrehajtható, valamint lehetőség van porózus szilícium kialakítására is. Ez utóbbi anyag alkalmazása a mikrorendszerekben jelenleg is kutatások tárgya.

2.3.2. Száraz marási eljárások

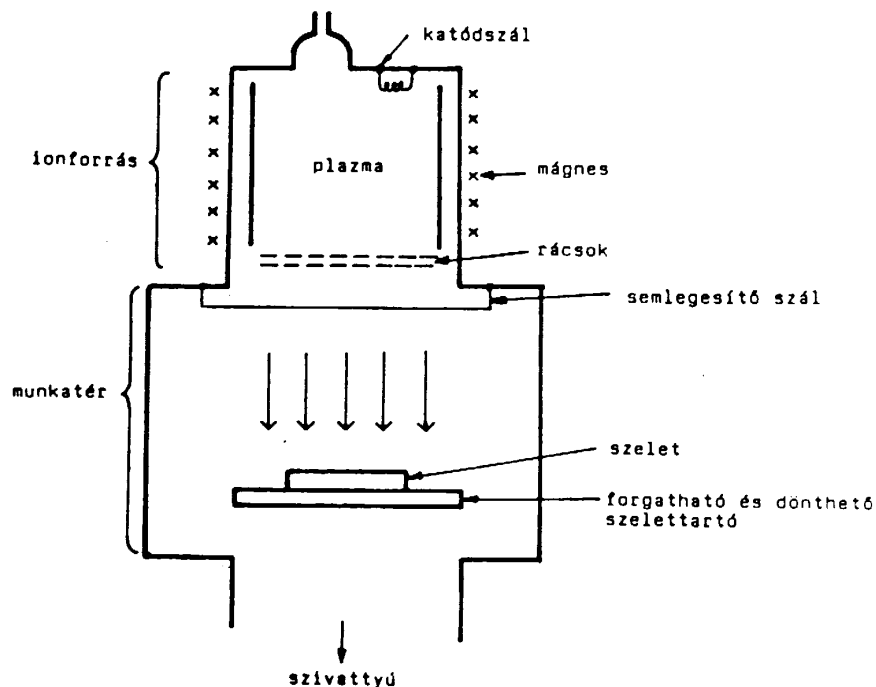
A száraz marási eljárások az utóbbi évtizedek technológiai fejlesztései következtében terjedtek el. Lényegük, hogy a marás ionizált gázok segítségével megy végbe. Izotrop és anizotróp módon maró eljárások egyaránt léteznek. Az anizotrópia ebben az esetben a maszk árnyékoló hatásának eredménye, és rendszerint a nagyobb energiájú plazmákkal kapcsolatban érvényesül.

Kiseb plazmaenergia esetén a marási folyamat alapvetően kémiai reakciók eredménye. A 100-500 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 (13. ábra).



13. ábra. 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 leporlaszják 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. Ezzel a technológiával készült az 1. ábrán feltüntetett "Kis Fal". Az ionmaró vázlatos képét mutatja a 14. ábra.



14. ábra. Ionmaró vázlat

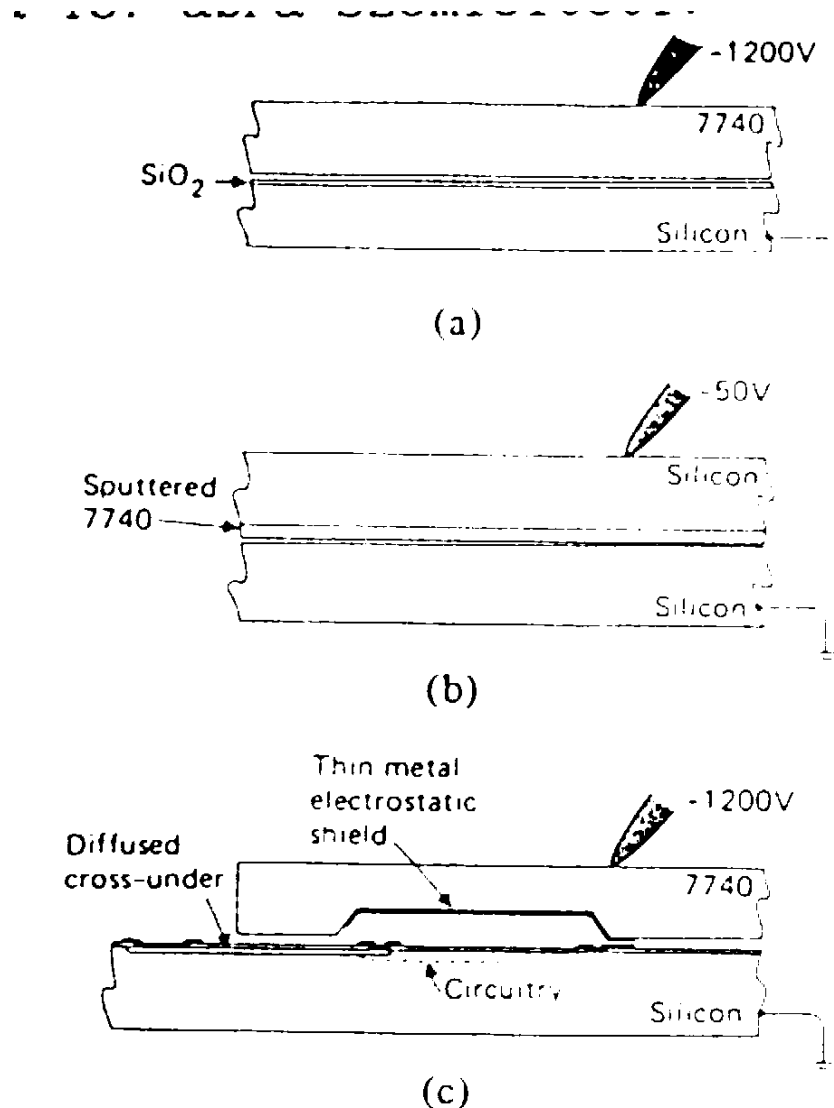
2.3.3. Hordozók egymáshoz kötése

A különböző tömb anyagok egymáshoz kötésének technológiáját először a SOI (silicon on insulator) alapanyaggyártáshoz fejlesztették ki. A szilícium hordozók egymáshoz kötéséhez az oxiddal borított lemezeket felmelegítve egymáshoz préselik, így azok a felületi rétegek összetapadásának következtében egymáshoz kötődnek. Az egyik hordozót azután csiszolással el lehet vékonyítani. Az eljárás eredménye az integrált áramköri technológiában igen jól használható, vékony, egykristályos réteg, amely tökéletesen el van szigetelve a mechanikai tartást megadó szilícium alaplemeztől. A szigetelőréteg a mikromechanikai technológiában feláldozandó réteggé szerepelhet.

Az összekötési folyamat gyorsítható, illetve alacsonyabb hőmérsékleten végrehajtható a darabok elektromos előfeszítésével, ami elősegíti a rétegek ionjainak mozgását,

összekeveredését (a diffúziós anyagáramlást ekkor sodródási anyagáramlás is kíséri).

Az eljárás segítségével nemcsak oxiddal vagy üveggel fedett szilícium lemezek köthetők össze, hanem tömb üvegek is (ekkor, a nagyobb vastagságok miatt ugyanakkora térerőhöz nagyobb feszültségre lehet szükség). Előzetesen már megmunkált munkadarabok kötésével különféle mikrogépek, gépelemek készíthetők. A különböző tömb anyagok egymáshoz kötésének technológiáját a 15. ábra szemlélteti.



15. ábra. Tömb anyagok (üveg, szilícium) egymáshoz kötésí módszerei

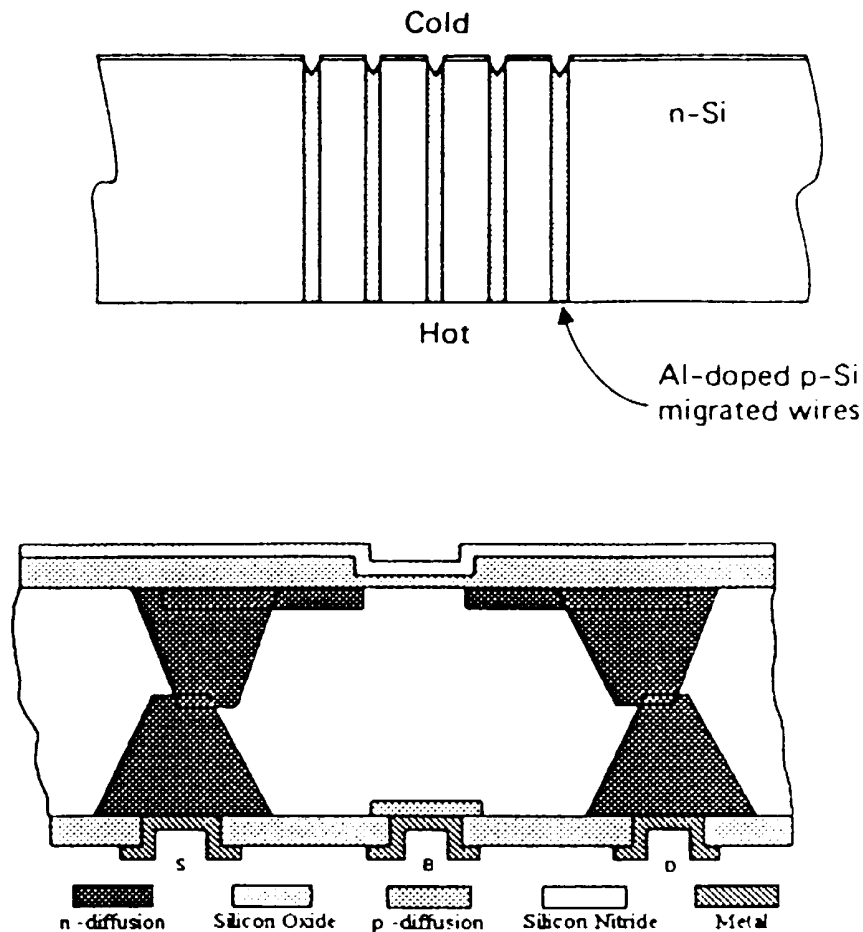
2.3.4. Elektromos összeköttetés megvalósítása a Si hordozó két oldala között

A mikroelektronika monolit IC technológiája lehetőség szerint elkerüli a hordozó irányából való elektromos csatlakoztatást. Ennek oka alapvetően a technológia planár jellege, s az, hogy lényeges előnnyel nem járna a hátoldali csatlakozás. Egyes mikrorendszerekben azonban elengedhetetlen a hátoldali csatlakozás megvalósítása.

Al/Si ötvözetpöttyök termomigrációjával "n" szilícium két oldala között teremthető kis ellenállású összeköttetés (16. ábra). Magas hőmérsékleten (1100 °C) a Si szelet felületére

felvitt alumínium ötvöződik a szilíciummal, az ötvöződés a hőmérsékletgradiens irányában halad előre, sebessége mikrométer/perc nagyságrendű. A szelet két oldala között néhány fok hőmérséklet különbséget kell tartani. Az eljárás előnye, hogy az oldalirányú diffúzió a több száz mikron vastag szeleten való keresztülhaladás után sem több 3-5 mikronnál.

Összeköthető a szelet két oldala mély diffúzió segítségével is. Az eljárás hátránya lassúsága mellett az, hogy a diffúzió anizotróp, az adalékatomok oldalirányban is mozognak. Ennek az a következménye, hogy a szelet vastagságával azonos nagyságrendbe esik az összeköttetéshez szükséges terület. A hátrányok csökkenthetők mindkét oldalról végrehajtott diffúzióval. Ekkor viszont meg kell oldani a diffúziós maszkok egymáshoz való illesztését. Ez meglehetősen nehéz feladat, és a mikroelektronikában épp ezért nem bevett eljárás.



16. ábra. Összeköttetés megvalósítása a Si szelet két oldala között termomigrációval, illetve diffúzióval

2.3.5. Mozgó alkatrészek előállítása feláldozandó rétegekkel

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 (pld. 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 marószerszel, illetve marási technológiával kezelhető. HF alapú marószerek esetén fotoreziszt maszkolási technika vagy Si_3N_4 védőréteg alkalmazható a megkimérendő 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.

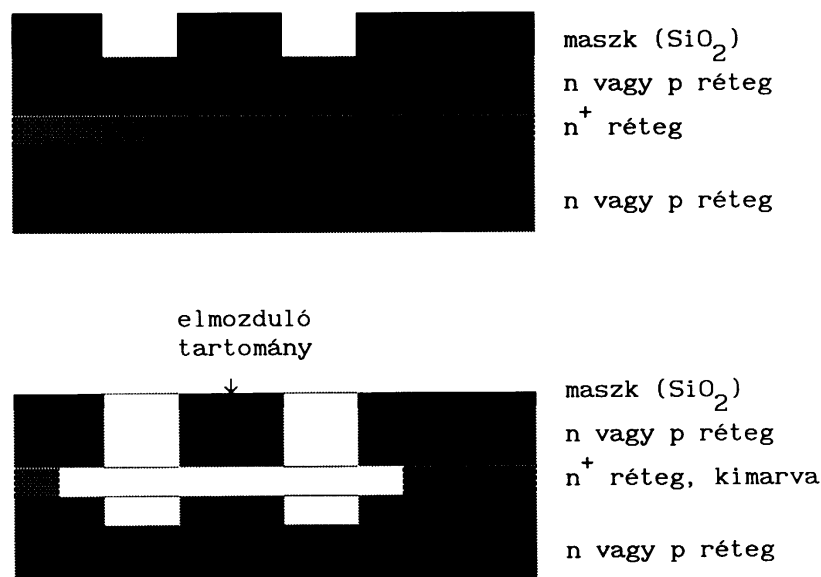
2.3.6. Néhány alapvető mikromechanikai technológia

A mikromechanikai technológiák kiforratlanságuk miatt még jóval távolabb állnak a szabványosítástól, mint az a mikroelektronikában megszokott. Jóval nehezebb tehát egy olyan eljárást választani, amely eléggé szemléletes. A következő néhány technológiai lépéssorozat egyrészt példa az előbbieken tárgyalt speciális technológiák alkalmazására, másrészt rávilágít azokra lehetőségekre, amelyek a mikroszerkezetek megvalósításában hasznosak.

Mint a neve is mutatja, igen egyszerű technológia a 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 (17. ábra).

A tervezett alakzatok 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.



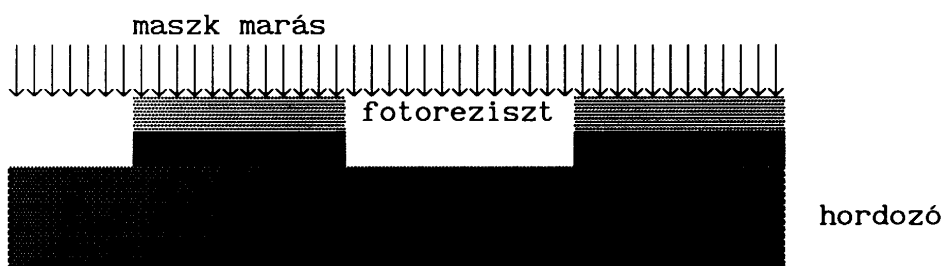
17. ábra. A SIMPLE technológia alapváltozata: rétegszerkezet a marás előtt, és a marás után

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.

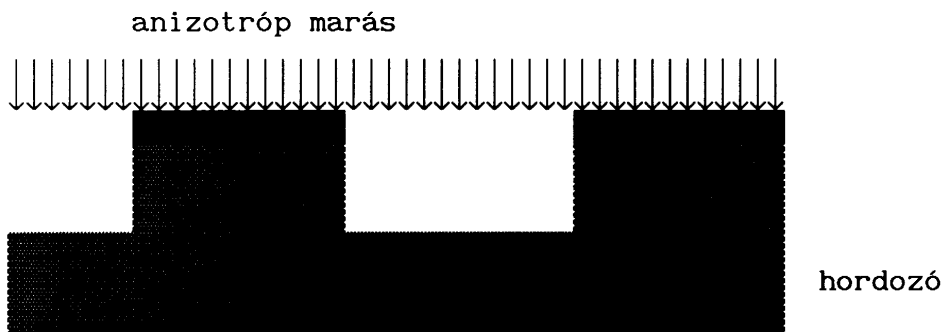
Az előbbi technológiához kissé hasonló, de annak továbbfejlesztett változata a SCREAM (single crystal reactive etching and metalisation, 18 ábra).



(a)



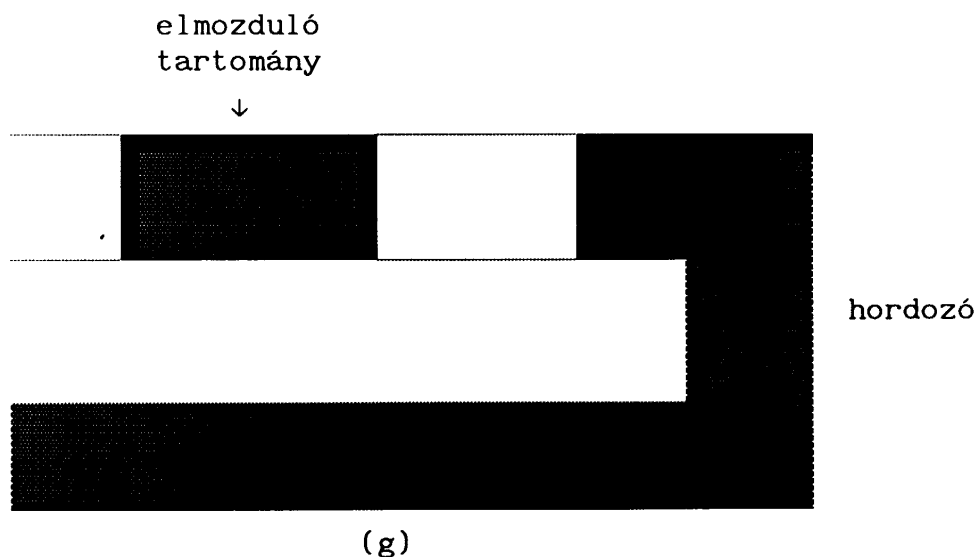
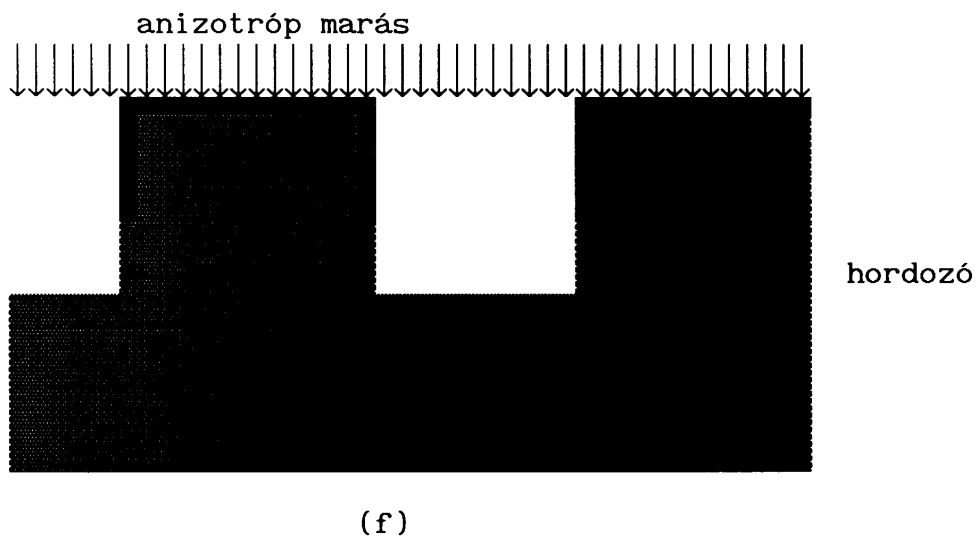
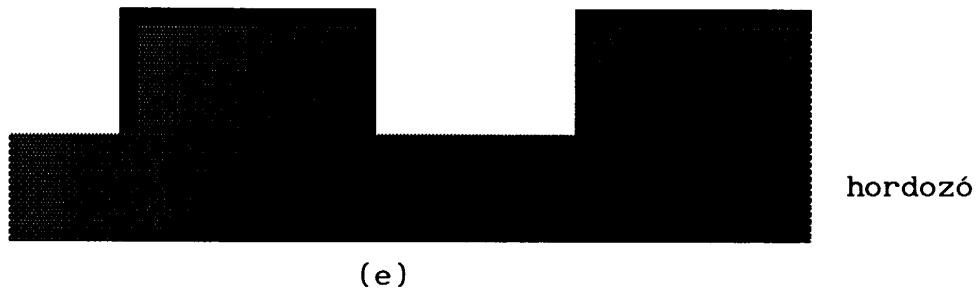
(b)



(c)



(d)



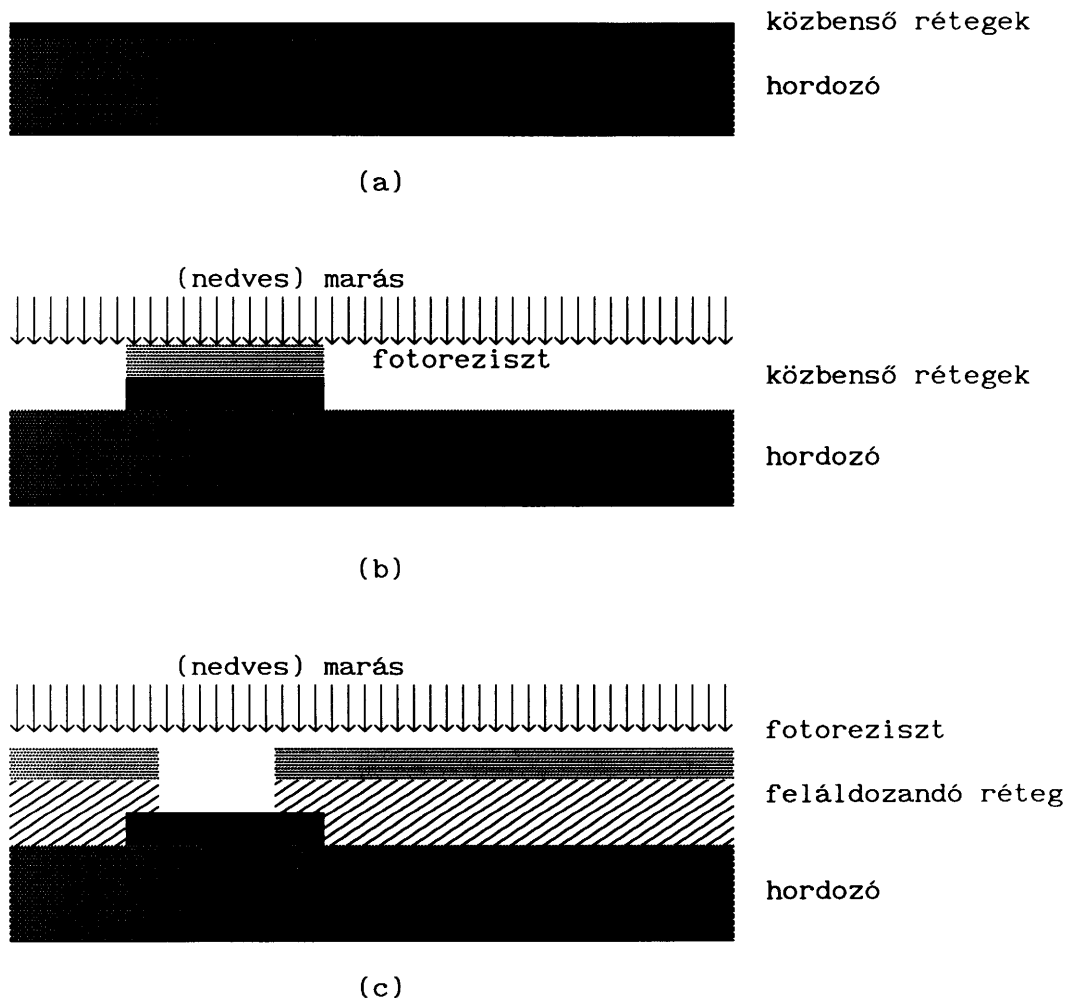
18. ábra. A SCREAM technológia

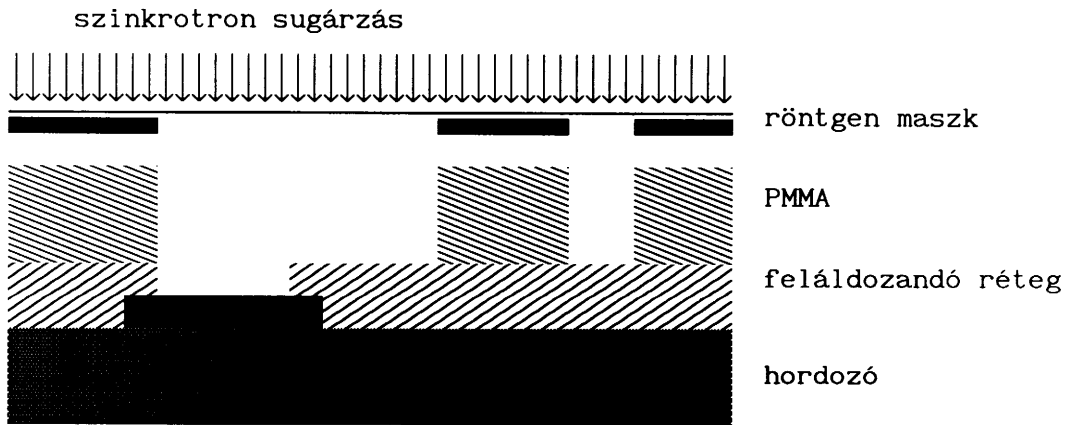
A hordozóra először a maszk oxid kerül fel (a) plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztással (PECVD). Ez a réteg a szokásos fotoreziszt technikával megmunkálható (b). Anizotróp marással a szilícium hordozóba meredek oldalfalú és igen mély árkok marhatók (c). Az egész szerkezetre (az oldalfalakra 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. 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 marható.

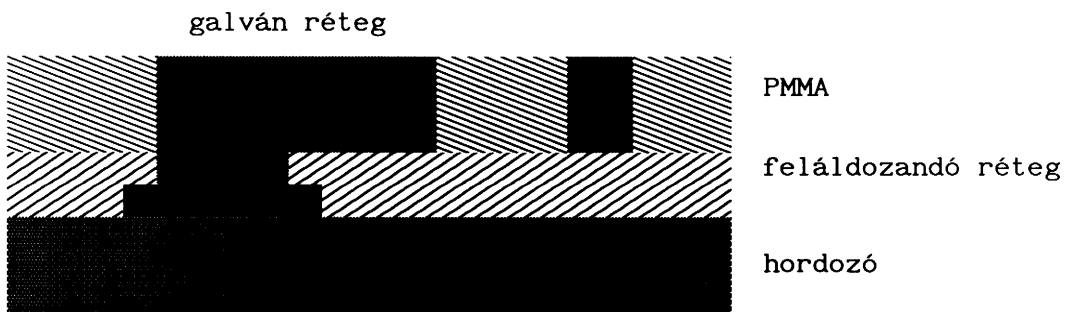
A SCREAM eljárás érdekessége, hogy a szerkezet oldalfalára leválasztott réteg maszkoló hatásának kihasználásával szemlélteti annak a lehetőségét, hogy miképpen terjeszthető ki a megmunkálás a felületre merőleges irányon túlra, azaz az oldalfalakra.

A mikromechanikai szerkezetek konstruálása során gyakran szükséges a csíkszélességhez képest igen vastag réteg előállítás. Erre a célra fejlesztették ki a LIGA (Litographie, Galvanoformung, Abformung) technológiát. Ennek alapelve emlékeztet a nyomtatott áramköri lemezek gyártástechnikája 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 19. ábra szemlélteti.

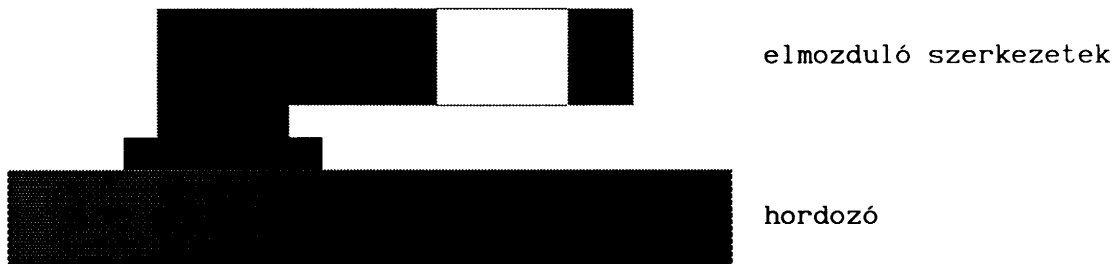




(d)



(e)



(f)

19. ábra. A LIGA technológia

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 keresztüli megvilágítása (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).

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

2.3.7. A mikrorendszerek tokozása

A mikroáramkörök technológiájának egyik legkritikusabb lépése az elkészült elemek tokozása. Még erősebben áll ez a megállapítás a mikromechanikai elemek, mikrorendszerek tokba szerelésére, a makroszkopikus világgal való kapcsolat megteremtésére. Nem egy jól sikerült eszköz működése hiúsult már meg a nem megfelelő tokozási eljárás következményeként.

A nehézségek fő oka, hogy az integrált mikrorendszerek nemcsak elektromos, hanem egyéb energiacsere útján is kapcsolatba kerülnek a környezetükkel. A tokozási megoldásnak tehát olyannak kell lennie, amely ezt az energiacserét lehetővé teszi. A mikroelektronikában megszokott szabványos tokok (kevés kivételtől eltekintve) többnyire nem használhatók mikromechanikai elemek, mikrorendszerek tokba szerelésére.

További probléma az eszközök és működési elvek sokfélesége: úgy tűnik reménytelen bármilyen új és általános tokozási megoldás kidolgozása, s ennek következményeként valamiféle szabványosítás. Minden eszközre egyedi tokozási eljárást kell kidolgozni, ami nehezzé teszi a technológia automatizálását.

Általánosságban az alkalmazott anyagok és technológiák széles választéka jellemzi a mikromechanikai elemek és mikrorendszerek szerelési technológiáit.

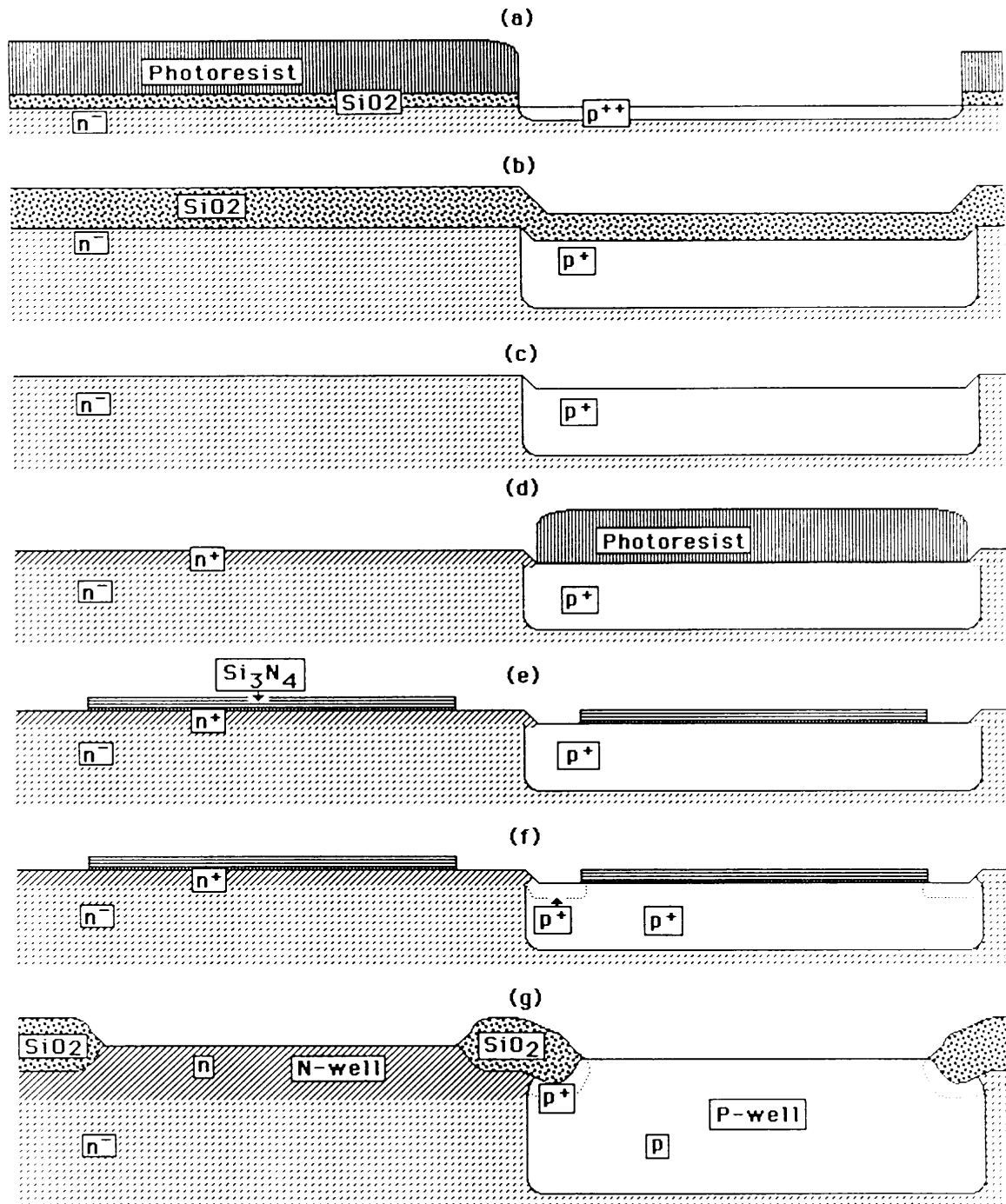
2.3.8. A szabványos technológiákhoz való illeszkedés kérdései

A mikrorendszerek megvalósítása során gyakran előfordul a mikroelektronikában már bevált, szabványos technológiák alkalmazása, különleges technológiai lépésekkel kiegészítve. Ezt nem mindig egyszerű megvalósítani, mert a szabványos technológiai lépéssorozatok az áramkörök elektromos tulajdonságaira nézve optimálisak, fejlesztésük során nem is volt lehetőség egyéb szempontok érvényesítésére.

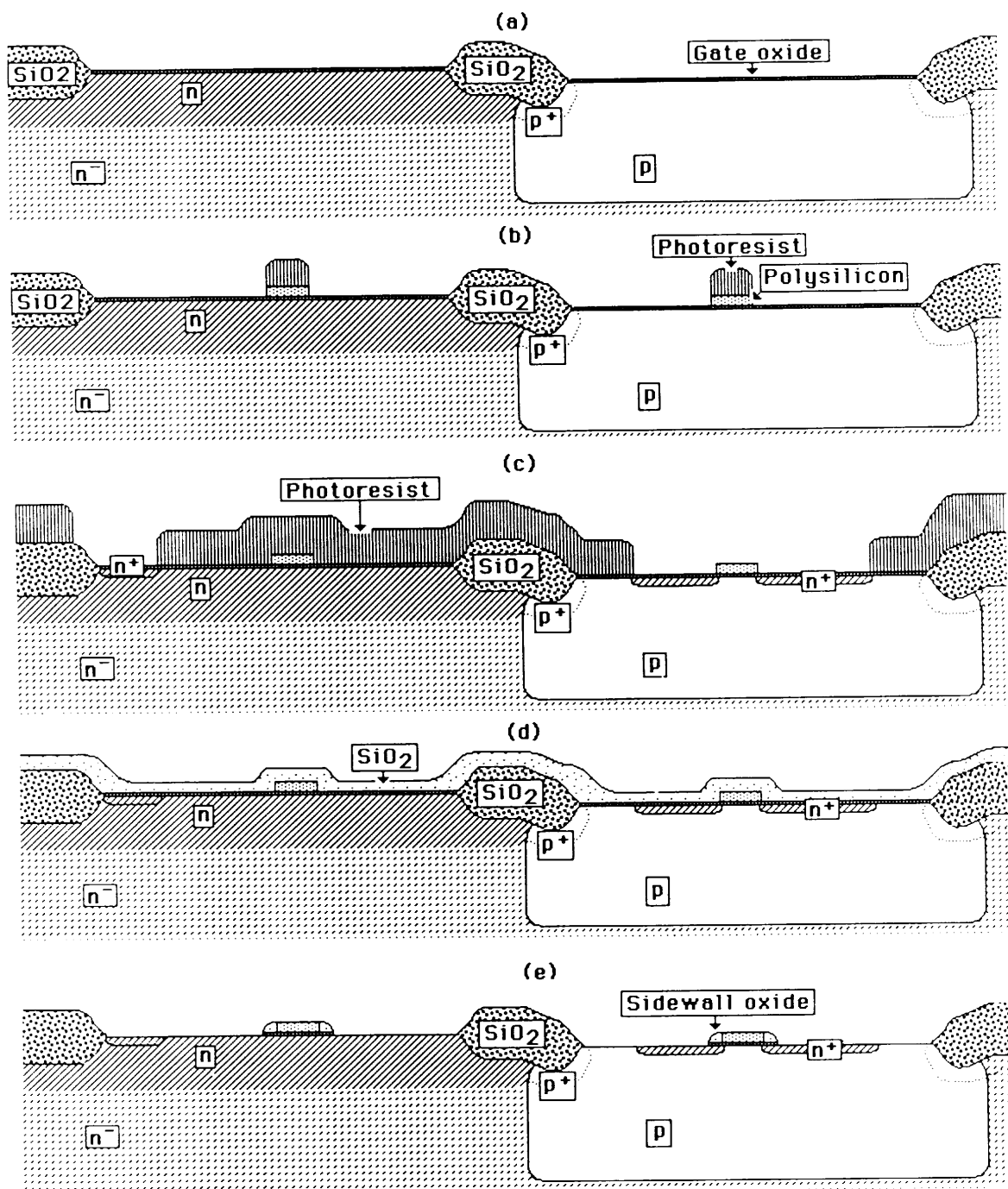
Az illeszkedés kérdése tehát több oldalról is előkerülhet. A mikromechanikai módszerekkel kialakított eszközöknek technológiailag és rendszertechnikailag illeszkedniük kell a rendszer elektronikus részéhez. A járulékos technológiai lépések csak olyanok lehetnek, amelyek összeférnek a tiszta gyártóterekre vonatkozó szabályokkal.

A szabványos technológiákhoz való illeszkedés szemléltetéséhez célszerű néhány, gyakran alkalmazott mikroelektronikai és mikromechanikai technológiai lépéssorozat bemutatása.

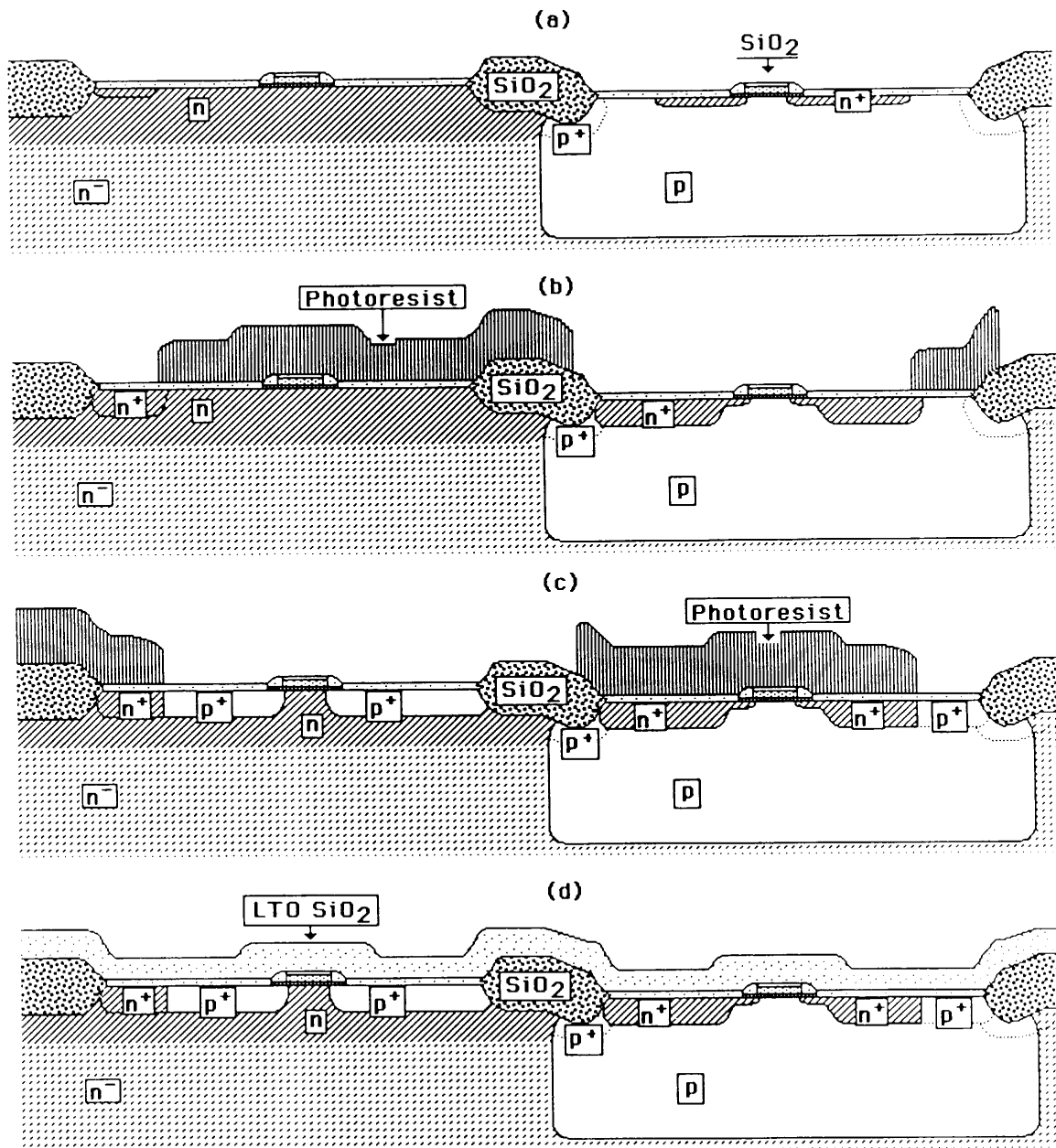
A mikroelektronikában használt egyik (többé-kevésbé szabványosnak tekinthető) CMOS technológia a 20-24. ábrákon bemutatott lépéssoron alapul.



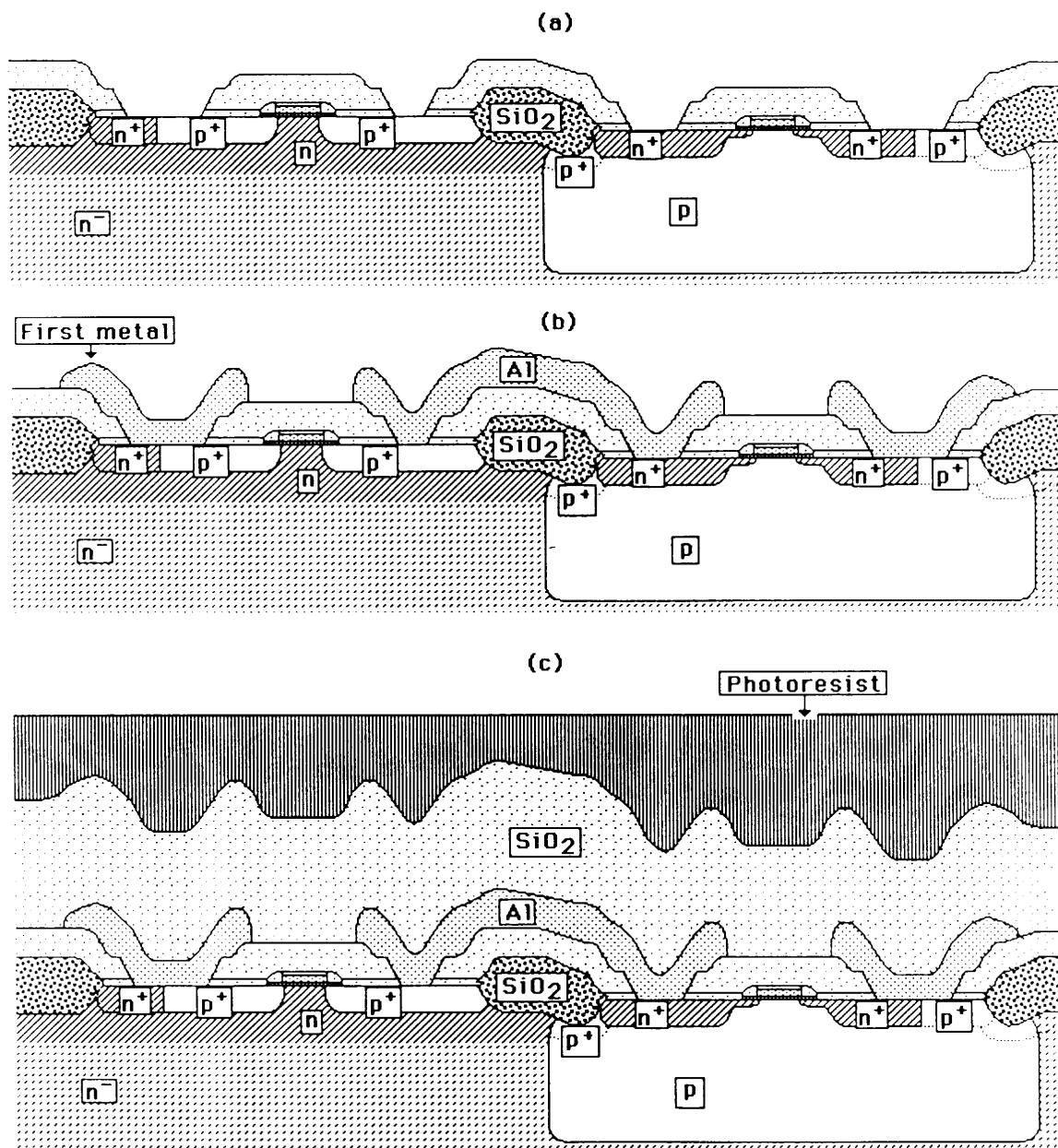
20. ábra. Zsebek kialakítása. Az "n⁻" vagy "n⁺n" hordozón növesztett termikus oxid maszkolásával készül a sekélyen implantált "p⁺" réteg (a). Ennek behajtása (b) adja a "p" zsebet. A behajtás alatt növe oxidot lemarva (c), fotoreziszt rétegből készült maszkon keresztül készül el az "n" zsebhez szükséges sekély "n⁺" implantált réteg (d). A következő réteg (e) egy vékony, termikusan növesztett ("pad") oxid, valamint egy kémiai úton gőzfázisból növesztett (CVD) szilícium-nitrid. Ez maszkolja a "p⁺" csatorna-stop implantált tartományokat (f), és a lokális oxidációt, ami alatt tovább folyik a zsebek diffúziója. A lokális oxidáció után a szilícium-nitrid réteget le kell marni.



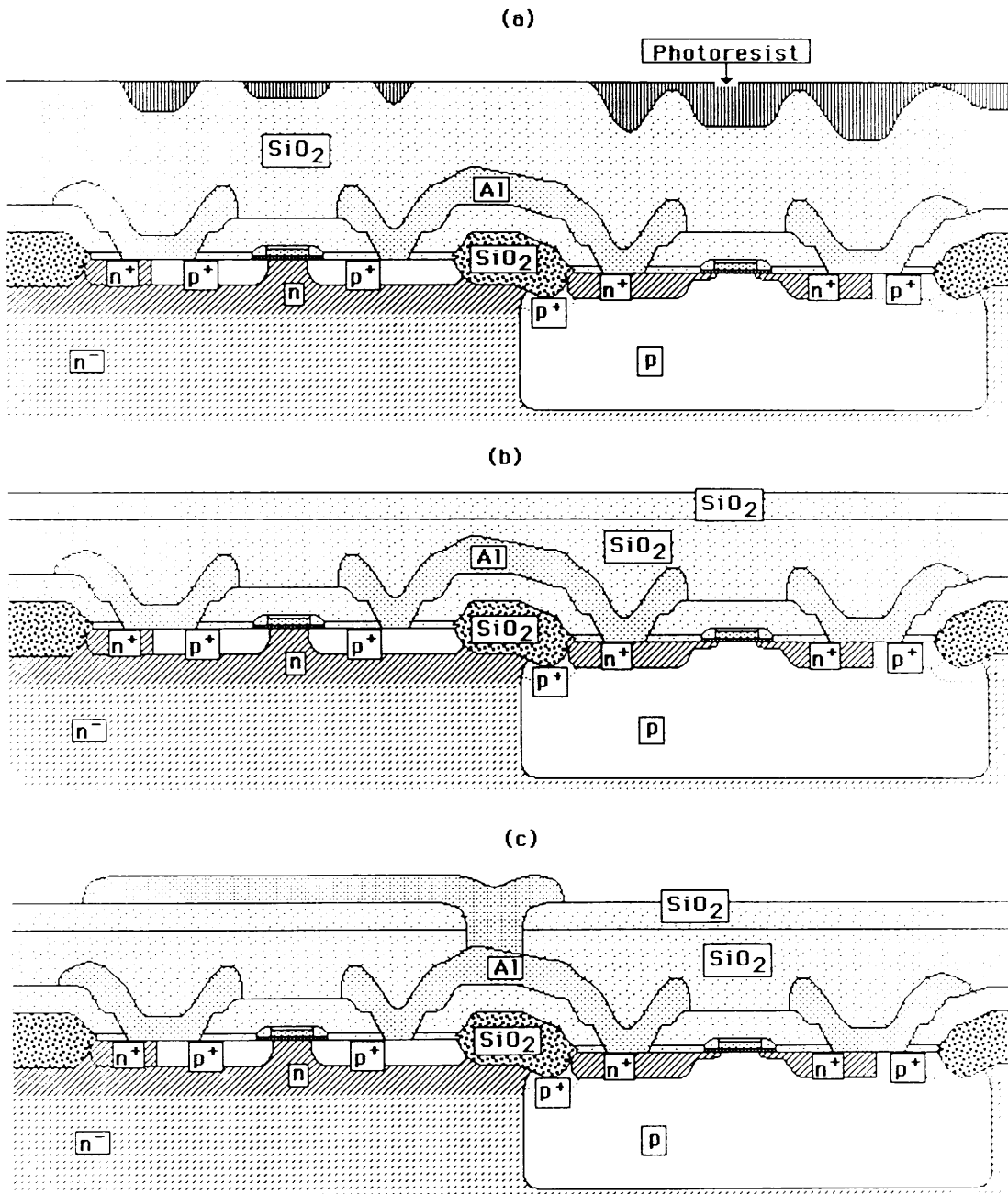
21. ábra. A vezérlőelektróda rétegszerkezetének kialakítása jóminőségű, vékony oxidréteg növesztésével indul (a), amelyre polikristályos szilícium kerül. Ennek megmunkálása (b) jelöli ki a csatorna tartományokat. Fotoreziszt és a megmunkált szilícium maszkon keresztül készül el az alacsony adalékolású nyelő tartomány alapjául szolgáló "n⁺" implant (c). A reziszt eltávolítása után alacsony nyomású CVD oxidból (d) plazma marással készül el a vezérlőelektródák oldalához tapadó ("spacer") réteg (e).



22. ábra. A MOS tranzisztorok kialakítása szintén egy vékony oxidréteg növesztésével indul (a). Fotoreziszt maszkon keresztül készülnek el az "n⁺" (b), a maszk negáltján a "p⁺" (c) mélyen implantált forrás-nyelő tartományok. Az egész felületet alacsony hőmérsékletű technológiával készített oxid borítja (d).



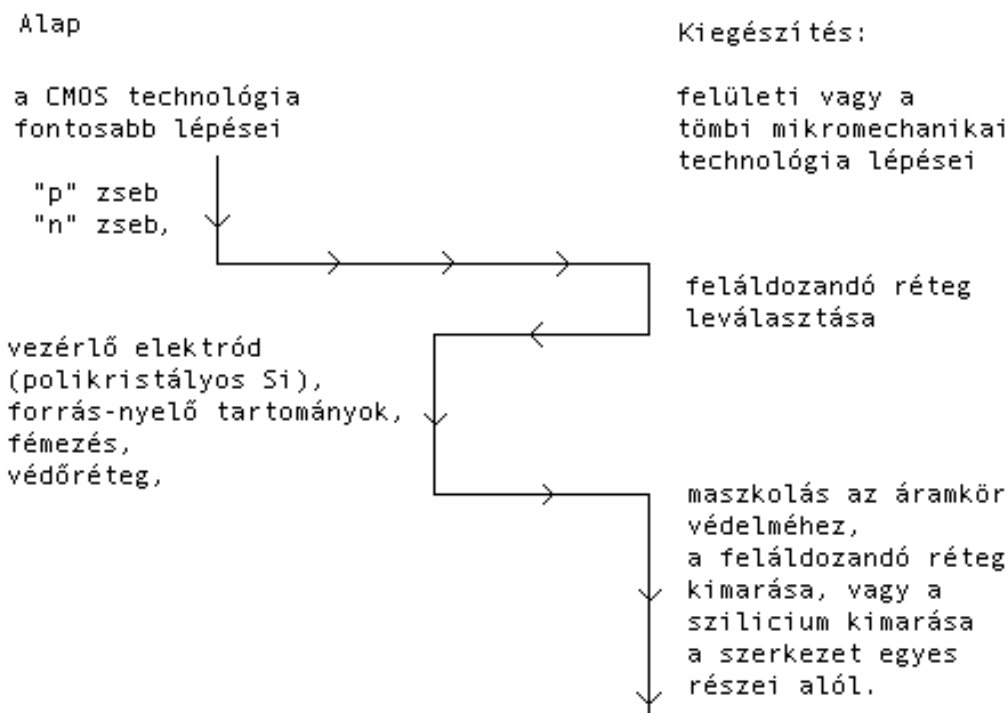
23. ábra Az első vezetőrég felvitele előtt kontaktus ablakokat kell nyitni (a). A vezetőrég fotoreziszt technikával megmunkálható (b). A megmunkált fémrétegre vastag oxidréteg, erre pedig sík felületet eredményező fotoreziszt réteg kerül (c).



24. ábra. A szerkezetet plazma marással kezelve (a) sík felület alakítható ki, amelyre újabb oxidréteg kerül (b). Az első vezető réteget fedő szigetelőn készül el (ablaknyitás után) a második vezetőréteg (c), ismét fotoreziszt technikával megmunkálva. Ha szükséges, az egész felület beborítható egy védő üveg, esetleg szilícium-nitrid réteggel.

Egyes lépések a különböző technológiai változatokban felcserélhetők, vagy ki is maradhatnak, de az eljárás gerince többnyire ugyanaz.

Az előbbi technológiai lépéssorozat megszakítása kiegészítő lépések beiktatásával lehetővé teszi mechanikai szerkezetek integrálását CMOS áramkörökhez (25. ábra).



25. ábra. Mechanikai szerkezetek integrálási lehetőségei CMOS áramkörökhöz

Az előbbieken említett felületi mikromechanikai technológiák közül a LIGA nem illeszkedik a tiszta gyártósorokon futó eljárásokhoz.

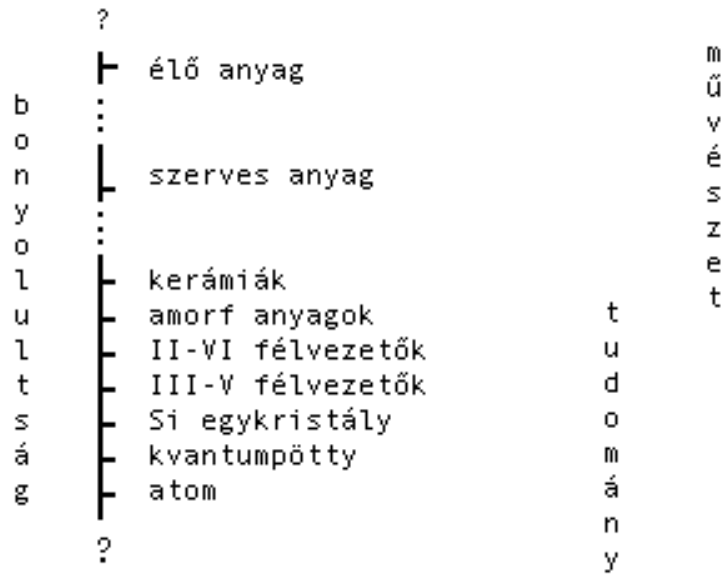
Tömbi mikromechanika és a mikroelektronika integrálása egyéb nehézségeket is felvet. Egyes alkáli tartalmú marószerek alkalmazása a tiszta gyártóterekben nem megengedhető. A megoldás ilyen esetekben a technológia utólagos alkalmazása (25. ábra, tömbi mikromechanikai technológiák).

2.3.9. Intelligens anyagok

Az intelligens anyag olyan mikrorendszer, amelyben nincs értelme az anyag-eszköz-rendszer elkülönítésnek. Az anyag előre megtervezett belső tulajdonságainál fogva képes viszonylag összetett feladatoknak megfelelni. Ennek háttere a környezethez való alkalmazkodás, az öndiagnosztika, az önjavítás és az önfejlesztés képessége.

Egyszerű példa lehet egy félvezetőből készített fűtőellenállás áramgenerátoros meghajtással. A szerkezet a nagyobb hőelvonást önműködően kiegyenlíti, hiszen a hőmérséklet csökkenése növeli az ellenállás értékét, ami a fűtőteltjesítmény növelésén keresztül a hőmérsékletet stabilizálja. Intelligens tulajdonság egyes anyagok önjavító képessége. A félvezetőkre általában káros hatással vannak a különféle sugárzások. Az indium-foszfid a benne keletkezett sugárkárosodást idővel kijavítja, sérült kristályrácsa regenerálódik.

Az 26. ábra mutatja a különböző bonyolultságú anyagokat. Ezek közül egyesek alkalmazása még tapasztalati ismereteken nyugszik, inkább "művészet", mint "tudomány". A fejlődés azonban rendkívül gyors ezen a területen, a helyzet ezért a közeljövőben a "tudomány" alapján való alkalmazások irányába tolódik el.



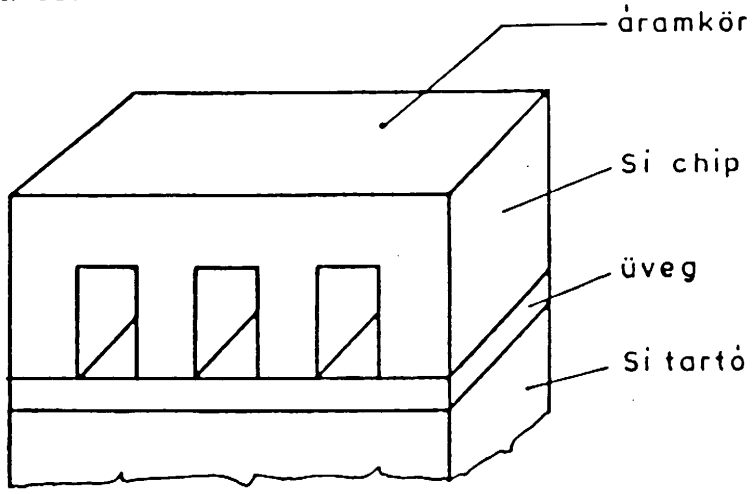
26. ábra. Különböző bonyolultságú anyagok

2.4. Mikromechanikai technológiákkal készült alkatrészek

A mikromechanikai elemek, rendszerek alapvetően két csoportba sorolhatók. A mozgó alkatrészt tartalmazók adják az egyik csoportot, ezek lehetnek dinamikus működésűek (membránok, hidak, pallók, lemezek, rezonátorok), vagy kinematikaiak (mikromotorok, fogaskerekek, csúszkák). A csak álló alkatrészt tartalmazók (sztatikus elemek: üregek, mikrocsatornák) adják a másik csoportot. Mindkét csoportra jellemző az elemek és működési elvek óriási választéka. Az itt bemutatott példák csak néhány fontosabb alkalmazási területet ölelnek fel.

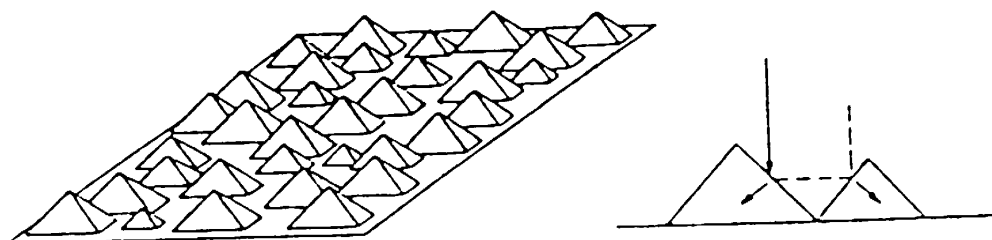
2.4.1. Mikroalakzatok

Nagy disszipációjú áramkörök esetében szükség lehet ezek hűtése cirkuláló víz segítségével. Erre a célra a 27. ábrán látható elrendezés szolgál. Az áramköri lapka hátoldalába kb. 20µm x100µm méretű csatornákat marva, majd egy igen vékony üvegréteg segítségével Si tartóra forrasztva a hűtőrendszer kész. Megfelelő tokozással megoldható a víz áramoltatása a csatornában.



27. ábra. Integrált áramkör hűtése mikrocsatornában keringő folyadékkal

A felület anizotróp marással való alakítása napelemek hatásfokának növelésére is felhasználható. A 28. ábrán látható felületi szerkezet úgy csökkenti a visszavert fény mennyiségét, hogy a többszörös visszaverődés során megnő az elnyelődés valószínűsége.



28. ábra. Napelem felületének reflexiócsökkentő kiképzése anizotróp marással

2.4.2. Áthidalások és konzolok alkalmazása

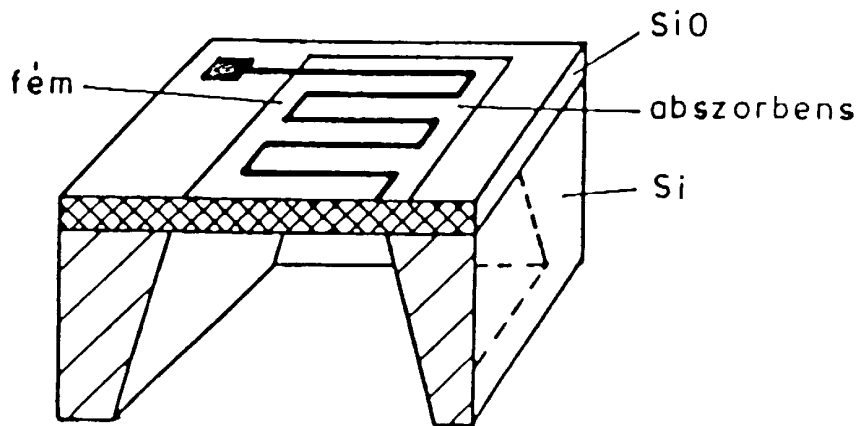
Az első igazi mikromechanikai elemek egyszerű áthidalások (érdekes, hogy a legnagyobb, ember által épített mechanikai rendszerek is a hidak), illetve egyik végen befogott rezgő lemezek voltak. Ezek készítéséhez csak a polikristályos Si réteg alatti hordozó, illetve szigetelő réteg kimarásának technológiáját kellett kidolgozni. Ezek az egyszerű mikromechanikai elemek is igen értékesnek bizonyultak azonban a különféle érzékelők és beavatkozók konstruálása során.

A legismertebb érzékelő célú alkalmazás a Si alapon létrehozott piezorezisztív nyomásmérő. Itt az aktív membránban (epitaxiális réteg, ld. 8. ábra) négy p típusú, hidba kötött ellenállást kell létrehozni. Az eszköz érzékenységét a membrán vastagsága és az átmérő, ill. ha a membrán négyzetes, akkor az élhosszúság hányadosa határozza meg.

Kis nyomások méréséhez néhány μm vastag membrán szükséges. Ezt úgy is elő lehet állítani, hogy a marási stop az implantációval erősen adalékolt felületi tartomány határán érvényesüljön. A membrán alól a szilíciumot hátoldalról kell kimarni. Nagyobb méretű Si lapkát használva, a nyomásmérő mellett ugyanazon lapkán előállítható az érzékelő jelét feldolgozó integrált áramkör is.

Az áthidaláson készített gázérezékelő igen kis fűtőteljesítménnyel működve is megfelelően magas hőmérsékletre melegszik. A fűtött áthidalás gázáramlás sebességének mérésére is alkalmas, a áthidaláson készített hőmérő beállási ideje a kis termikus időállandó következtében igen rövid.

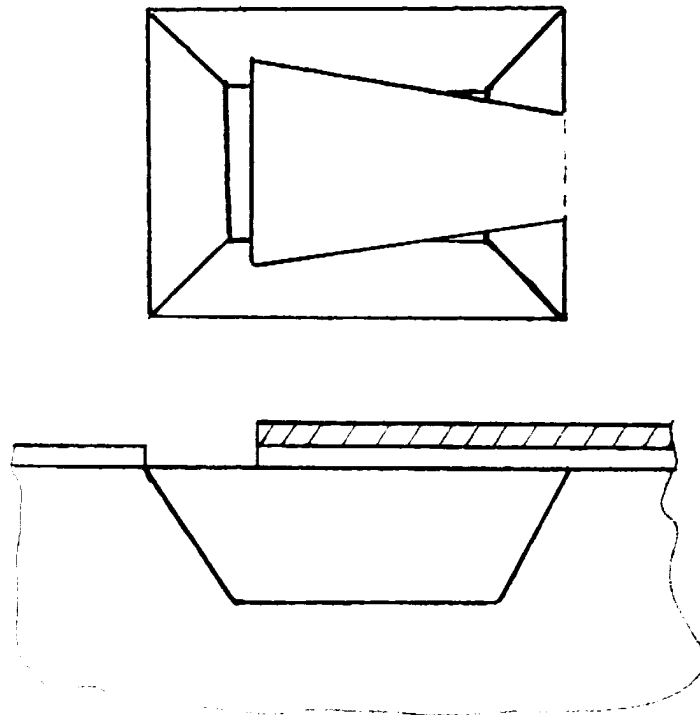
A termoelem vagy bolométer (29. ábra) gyártásához a Si szelet felületére kb. $2\mu\text{m}$ vastag SiO_2 kell előállítani. Az oxidra vakuumpárolgatással lehet felvinni a fém (pl. Ni) bolometert ill. fém párokból a termooszlopot. Ezután a szelet hátoldalán ablakot nyitva az oxid alól a szilíciumot kioldjuk. Az oxidot a maró nem támadja meg, így létrejön egy igen vékony, SiO_2 membrán, rajta a már létrehozott aktív réteggel. A membránt a megmaradó Si keret tartja.



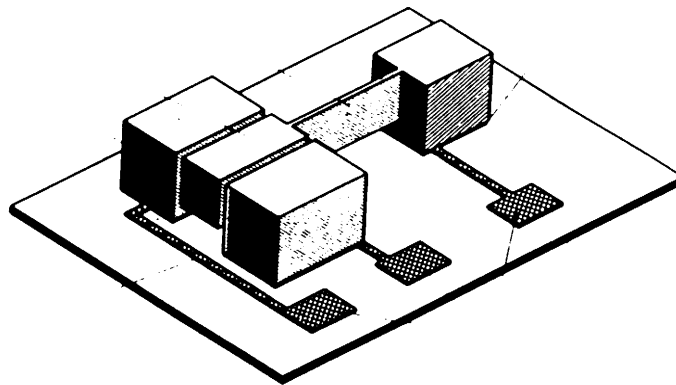
29. ábra. Gázáramlás, illetve hőmérséklet mérésére alkalmas mikroszerkezet

Az egyik végén befogott rezgő lemez mint rezonátor (rezgés, gyorsulás érzékelő) vagy elektrosztatikus elven alapuló fényeltérítő (modulátor) működhet.

A gyorsulásmérők mikrokivitelben rugalmas lemezre erősített tömegekből állnak. A tömegre ható gyorsulás a lemezre a gyorsulással arányos erőt eredményez, melynek hatására nyugalmi helyzetéből elhajlik. Egy egyszerű mikroméretű gyorsulás érzékelő szerkezete a következő (30. ábra): n típusú szilícium felületén 1-2 μm vastag oxidra fémréteget párologtatva létrehozható egy kondenzátor egyik fegyverzete. A fém maszkolása és marása után az oxidba U alakú ablakot nyitva (melynek élei eltérnek a (011) iránytól) az oxid alól a szilícium kimartható. A marás után kialakul az ábra szerinti egyik végén befogott SiO_2 lemez. A Si test és a lemez fémzése kondenzátort alkot, melynek kapacitása a gyorsulással arányos. LIGA technológiával is készíthető gyorsulásmérő (31. ábra).

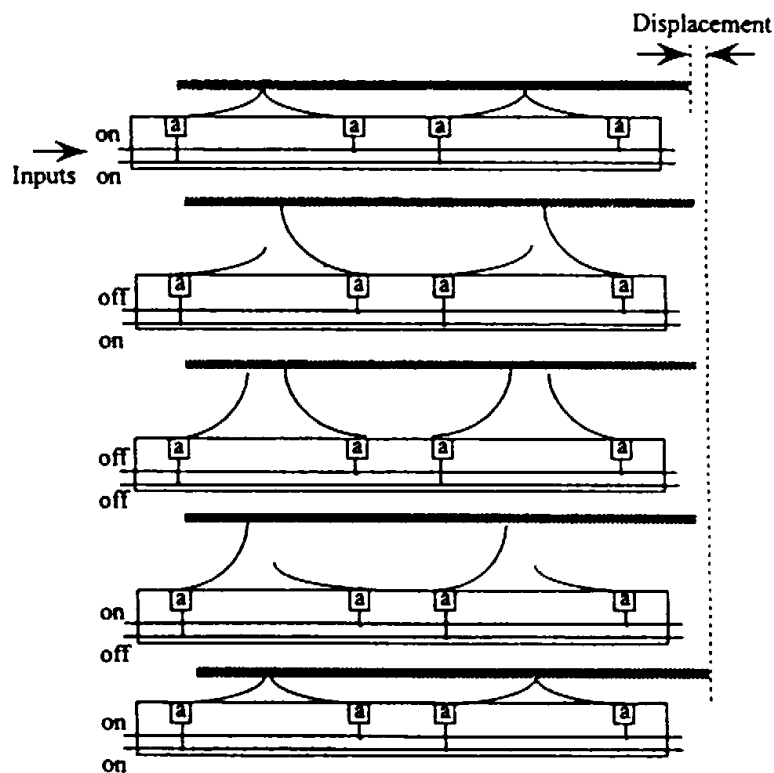


30. ábra. Kapacitív gyorsulásmérő



31. ábra. LIGA technológiával készített kapacitív gyorsulásmérő

Kettős, különböző hőtágulási együtthatójú anyagokból felépített rétegszerkezettel az egyik végén befogott tartó megfelelő fűtéssel alakváltozásra is készíthető, rezgethető. Elektrosztatikus úton is mozgathatók a lemezek. Sok ilyen lemezkét készítve egy felületre olyan mechanizmus hozható létre, amely lehetővé teszi kisebb alkatrészek mozgását, továbbítását, forgatását (32. ábra).

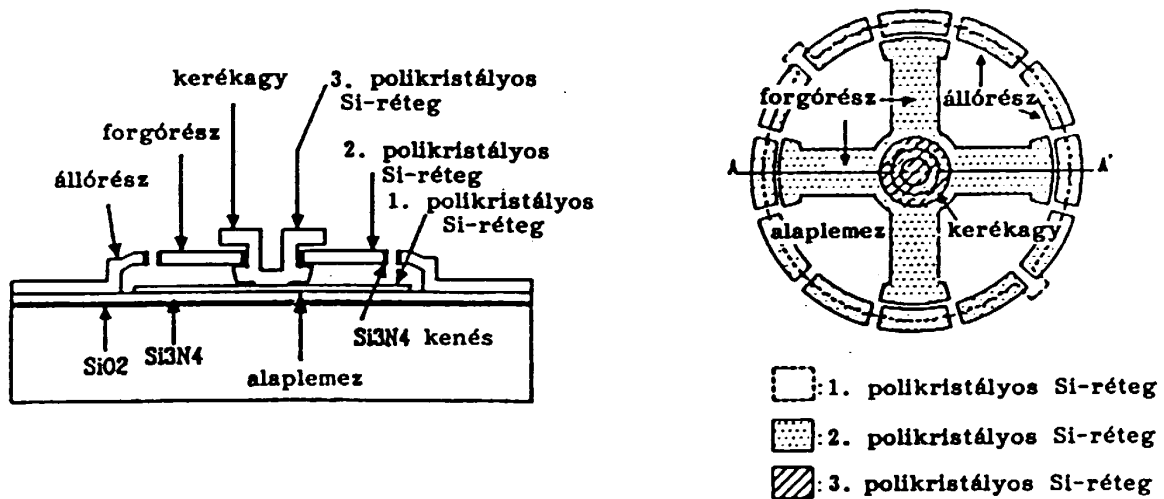


32. ábra. Mikroalkatrész szállító mechanizmus

2.4.3. Forgó szerkezetek

Két vagy három polikristályos Si réteg, valamint üvegrétegek egymást követő leválasztása már tengelyeken elforduló, egymásba kapcsolódó szerkezetek megvalósítására is lehetőséget ad. Fogaskerek, csuklós, mozgó mechanizmusokon túl igen apró elektromotor megvalósítására is lehetőség van. Az elkészített elektrosztatikus aszinkron motor 100 V

feszültséggel táplálva percenként 500-as fordulatot ért el. A rotor átmérője 60 mikrométer (kb. az emberi hajszál vastagsága), vastagsága 1 mikrométer, a légrés 2 mikrométer volt. Készültek elektrosztatikus léptetőmotorok is. A súrlódás csökkentésére szilícium-nitridből készített kerékagy (csapágyazás) szolgált. Háromfázisú vezérléssel működtethető szinkron elektrosztatikus motor is készült az előzőhöz hasonló technológiával. Egy mikromotor szerkezete látható a 33. ábrán.



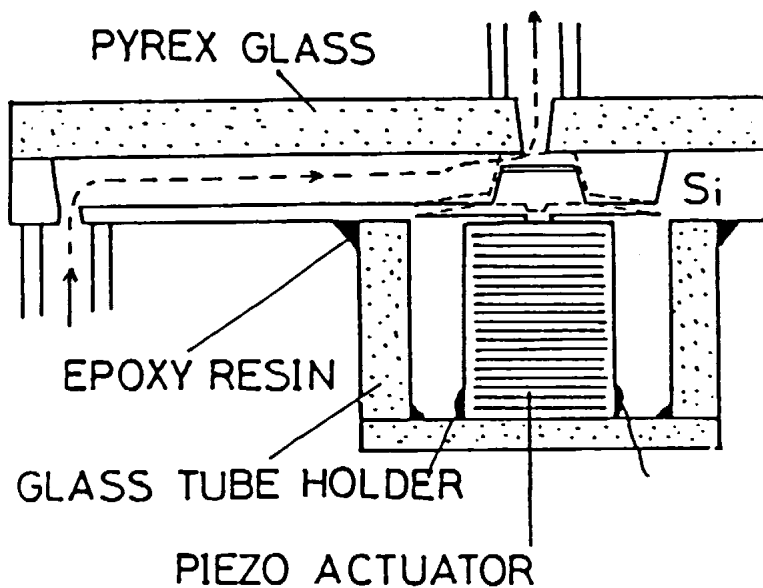
33. ábra. Mikromotor

Mikromotorral meghajtott fogaskerek segítségével mikroméretű fogaskerékszivattyú készíthető. Hasonló szerkezet áramlásmérőként is működhet.

Biológiai kutatások hasznos segédeszköze lehet a tizedmilliméter hosszúságú, 6 mikrométeres nyílású, elektrosztatikus működtetésű mikrocshipesz.

2.4.4. Fluid eszközök

A Si hordozó marása nagyobb szerephez jut a miniatúr pneumatikus/hidraulikus elemek készítésében, de ezekhez is szükség lehet a polikristályos Si leválasztására. A pneumatikus/hidraulikus rendszerek egyik alapeleme a szelep, amely a szilícium hordozón fűrt lyukon áramló gáz mennyiségét szabályozza. A szelep működtetése piezoelektromos aktuátorral lehetséges, esetleg a szeleptányérra felvitt ferromágneses réteg alkalmazása és külső mágnes közelítése vagy távolítása révén. Egy piezoműködtetésű szelep látható a 34. ábrán.



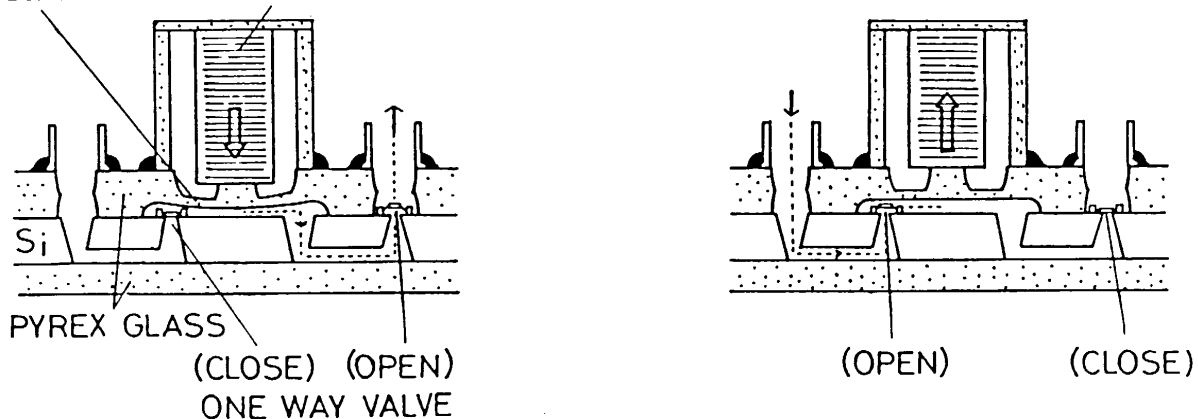
34. ábra. Szelep, piezoelektromos vezérléssel

Egyik irányban nyitó szelepekből és piezoelektromos mozgató mechanizmusokból sikerült mikroliter/perc szívósebességű mikroszivattyút építeni (35. ábra). Alapja Si lap, melybe szelektív marással üreget és két szelepet lehet marni. A megfelelően kimart Si lapot üveghordozóra rögzítjük pl. elektrosztatikus kötéssel. Az üvegbe be van forrasztva v. ragasztva a bemenő és a kimenő cső. A Si másik lapjára igen vékony (0.1 mm vastag) üveg van ragasztva. Ez az üveglemez a szivattyú membránja. Az üvegmembrán rezgetése mechanikusan, piezoelektromos elemmel, vagy zárt térbe helyezett fűtőelem ki-be kapcsolásával létrehozott nyomáskülönbségekkel érhető el. Piezo-rezisztív nyomásérzékelővel egyesítve a szeleprendszert átfolyásmérő érzékelő építhető, szintén mikroliter/perc áramlási sebességekre.

Az egykristályos Si felületének marásával készült el a legkisebb fluid erősítő, ami valaha is működött, jellemző mérete 30 mikrométer.

A mikro fluidika körében vannak egyébként a mikromechanika gyökerei: már a nyolcvanas évek elején elkészült egy teljes gázkromatográf egyetlen szilícium szeleten.

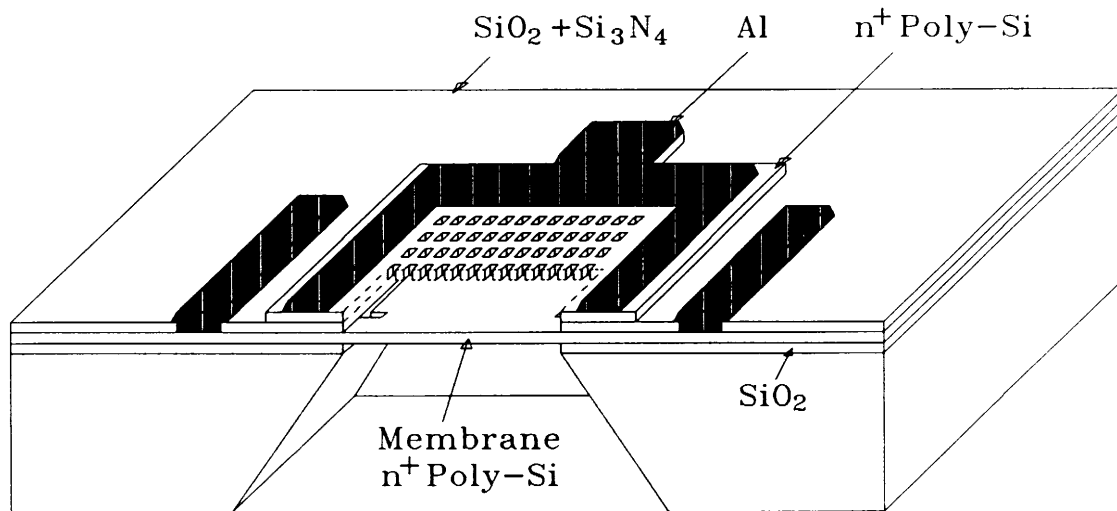
DIAPHRAGM PIEZO ACTUATOR



35. ábra. Mikroszivattyúk felépítése

2.4.5. Mikrofonok

Akusztikus érzékelők (mikrofonok) is készültek mikromechanikai technológiával. Külön előny, hogy az ultrahang leképező rendszerhez szükséges érzékelő mátrix elemeihez az előerősítő igen közel megvalósítható, ezáltal a szórt kapacitások hatása nem gyengíti le a kisméretű érzékelő által adott, amúgy is kicsi jelet. A kis méretnek persze nemcsak az ultrahangok, hanem a kisebb frekvenciák tartományában is vannak előnyei.



36. ábra. Mikromechanikai technológiával megvalósított mikrofon

2.4.6. Termikus elven működő mikrorendszerek

Termikus hőkép-szimulációhoz (dynamic thermal scene simulation, DTSS) kétdimenziós hőemitter tömb (mátrix) szükséges, a megfelelő szabályozó áramkörökkel és címzési lehetőséggel. Szilícium mikromechanikai megmunkálásával már készültek látható fényt vagy hősugárzást emittáló források, illeszkedve az integrált áramköri technológiákhoz. A szerkezet alapja egy termikusan elszigetelt "lebegő", fűthető ellenállás, amelyet eredetileg gázáramlás érzékelésére fejlesztettek ki.

A CMOS áramkört, amely már a fűtőellenállásokat is tartalmazta a polikristályos szilícium rétegből kialakítva, 3 mikronos csíkszélességet használó, 13 maszkos technológiával valósították meg. Az IC gyártól a megrendelés alapján kapott szeleten már csak egy maszk nélküli marási lépést kellett végrehajtani a fűtőellenállások alatti tartomány eltávolítására. A maratás nem befolyásolta a lapkán elhelyezkedő egyéb elemek paramétereit. Mind a polikristályos fűtőellenállások, mind pedig a fűtőelemeket a levegőben tartó fém szalagok gőzfázisú kémiai leválasztással készült (CVD) üvegrétegbe vannak beágyazva.

A fűtőellenállások értékei 20% szórással teljesítették a gyártó által megadott értéket, 18.3 mW teljesítménnyel fűtve 334 C-fok hőmérsékletet érnek el (kb. 10 ms-nyi idő alatt). Az ellenállások 10^8 -nál több hőciklust is elviselnek, és vörösizzásig hevíthetők, bár a vörösizzás hőmérsékletén már gyorsan tönkremennek.

2.5 A mikrorendszerek lehetséges alkalmazásainak összefoglalása

Orvosi, biológiai: sejtek kezelése, egyesítése, intelligens tabletták, mikrosebészet, gyógyszer adagolás, vér analízis, idegi és agyi elektromos impulzusok érzékelése, az idegek ingerlése, ingerlés tapintás útján és a bőr közvetítésével.

Áramló közegek: mikroszelepek, mikroszivattyúk, fluid elemek, fluid erősítő, folyadék és gáz kromatográfia.

Mikrooptika: optikai szálak kezelése, optikai pásztázás, moduláció és beállítás, interferométer, optikai olvasófej, változtatható fókuszú tükör, optomechanikai integrált áramkörök.

Mikroanalízis: pásztázó alagút mikroszkópia (STM), atomerő mikroszkópia (AFM) és egyéb pásztázó felületvizsgálati módszerek, közeltéri mikroszkópiák, alagúttárral működő mérő érintkező rendszer.

Számítástechnikai hardver: mágneses olvasófej, nyomtató fej, lézer pásztázó, mikromechanikai memória, STM tárolólemez, képernyők, kijelzők, mikrosatornás hűtőrendszerek.

VLSI gyártás: vákuum manipulátor, mikropozicionálás, tömegáramlás szabályozás.

Robot technika: mikrorobotok, mozgás érzékelők, mikro távérzékelő robotok.

Szabályozástechnika, automatizálás: érzékelők, jelátalakítók mikro kivitelben.

A jövőbeni lehetőségek előhírnöke az automatikus inzulin-adagoló készülék, amely az emberi testbe beépítve jóval nagyobb szabadságot ad a cukorbeteg embernek. A szerkezet igazi összetett mikrorendszer: mikroérzékelőket, integrált áramkörös elektronikát, mikromotort és szivattyút tartalmaz, és a vércukorszintre vonatkozó adatok elemzése után a szükséges inzulin mennyiséget a vérbe juttatja.

A véregekbe juttatott mikrogép, amely folytonosan tisztítja az érfalat, vagy érzékelőjével felismeri és fogaskerekével elroncsolja a vérben található kórokozókat ma még szintén csak az elgondolás szintjén létezik. A megvalósítás előtt álló akadályok azonban egyre fogynak.