

## 2. Az integrált áramkörök gyártástechnológiája I. - Alapfogalmak

Szerző: Dr. Szabó Péter Gábor, Plesz Balázs, Dr. Bognár György, Takács Gábor, dr. Végh Gerzson

### 2.1. A szilícium technológia (Silicon manufacturing process)

A mai integrált áramkörök túlnyomó többsége szilícium alapanyagú horodozón készül. Egyéb célokra (pl.: optoelektronikai, nagyfrekvenciás, teljesítményelektronikai eszközök) készülhetnek más, legtöbbször vegyületfélvezető anyagból (pl. szilícium-karbid, gallium-arzenid stb.), melyek azonban inkább diszkrét vagy alacsony integráltságú eszközök.

A szilícium alapú integrált áramköri gyártástechnológia eleinte a szilícium jó elektromos tulajdonságainak köszönhető a széles körű elterjedését, melyhez hozzájárult a könnyen növesztethető, jó szigetelő és maszkoló réteggént egyaránt használható oxidja: a szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ). Mindezek eredményeképpen mára a szilícium alapanyagra épülő gyártástechnológia annyira fejletté vált, hogy a mai IC-k integráltsági szintjét és gyártási költségét más félvezetőkkel egyelőre megközelíteni se lehet. Azért, hogy erről a területről teljesebb képet kapjunk a következőkben a szilíciummal, mint félvezető alapanyaggal, és a szilícium alapanyagú hordozóra planártechnológiával készült integrált áramkörök gyártástechnológiájának néhány fontos aspektusával ismerkedhetünk meg.

Az integrált áramkörökben az áramkör összes tranzisztorát és egyéb elektronikus alkatrészét (dióda, ellenállás, stb.) egy chipen, azaz egyetlen egy darab szilícium chip-ben alakítják ki. Ehhez a kezdetben egységes szilíciumtömb anyagtulajdonságait lokálisan meg kell változtatni, hiszen csak így alakulhatnak ki a különböző elektronikus alkatrészekhez (pl.: tranzisztorok, diódák) szükséges, eltérő anyagtulajdonságokkal rendelkező rétegek. Integrált áramkörökben nagyszámú eszközt alakítanak ki (modern processzorokban akár több milliárd tranzisztor lehet egy chip-en), és az egyes eszközök elválasztása is eltérő anyagparaméterű részekkel történik. A monolit (azaz egy alapanyagtömbben kialakított) integrált áramkörök kialakításához tehát szükségünk van egy olyan technológiára, amelynek segítségével a tömbi szilícium anyagi (főként elektromos) paramétereit csak és kizárólag a kívánt helyen változtathatóak meg.

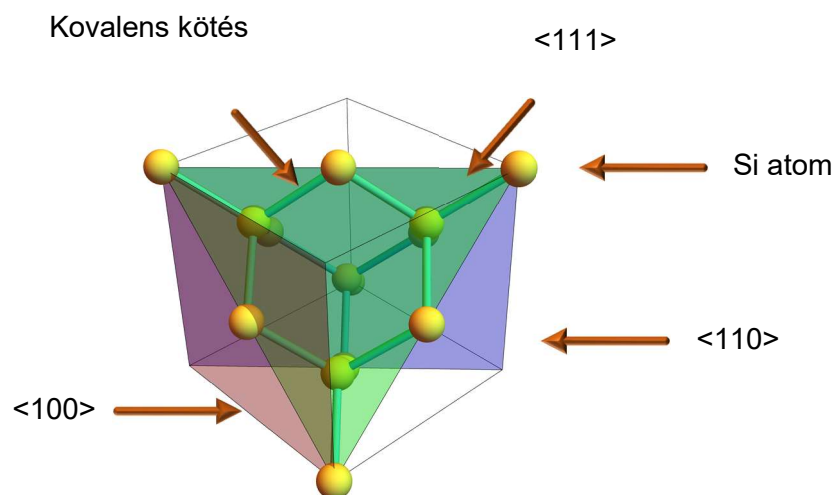
Az alapanyag villamos paramétereit általában adalékolással, azaz idegen atomok szándékos, célzott és kontrolált bevitelével változtatjuk meg lokálisan, így kialakítva az aktív eszközökhöz szükséges donor és akceptor adalékolású (n és p-típusú) régiók, melyek a félvezető elektron és lyukvezetési képességeit határozzák meg. [1] Szilícium félvezető esetén adalékanyagnak leggyakrabban foszfor (P) és bór (B) anyagot alkalmaznak.

Az adalékolás mellett léteznek további technológia lépések, amelyeket csak lokálisan szeretnénk végrehajtani, mint például a tömbi szilícium vagy egyéb rétegek lokális eltávolítása, marása vagy éppen ennek az ellentéte, egyes rétegek lokális növesztése. Ahhoz, hogy ezeket a lépéseket csak lokálisan végezhessük el (tehát mintázatot tudjunk kialakítani), szükség van egy olyan ún. maszkoló rétegre, amely megvédi az alatta lévő

alapanyagot azokon a helyeken, ahol az egyes folyamatokat nem szeretnénk végrehajtani. Ennek a maszkoló rétegnek tehát nem a teljes felületen, hanem csak meghatározott helyeken (lokálisan) kell a felületen lennie, ezért a maszkoló rétegeken is mintázatot kell kialakítani. Ez általában úgy történik, hogy a maszkoló réteget a teljes felületre felviszik (például  $\text{SiO}_2$  esetén növesztéssel), majd fotolitográfiával (2.6. fejezet) jelölik ki azokat a helyeket, ahol nincs szükség maszkoló rétegre, és innen egy szelektív (például csak a megvilágított maszk anyagot támadó) marószersz segítségével eltávolítjuk a nem kívánt részeket. A megfelelő mintázattal rendelkező maszkoló réteggel borított félvezetőn pedig már elvégezhetjük az adott – mintázatnak megfelelően, csak lokálisan – elvégzendő gyártástechnológiai lépéseket (adalékolás, maratás, rétegnövesztés stb.). A különböző adalékolású részeket (2.7. fejezet), felületen futó vezetékeket, stb. tehát gyakorlatilag a kész integrált áramkört az előzőekben vázolt folyamat (maszkolás, fotolitográfia, mintakialakítás) gondosan megtervezett sorrendben történő ismétlésével alakíthatjuk ki. A szilícium alapú integrált áramkörök gyártástechnológiája így különböző részfolyamatokból épül fel, ahol minden egyes részfolyamat lényegében a maszkoló réteg felviteléből, maszkoló réteg mintázásából és az alapanyag jellemzőinek változtatására szolgáló technológia lépésből áll.

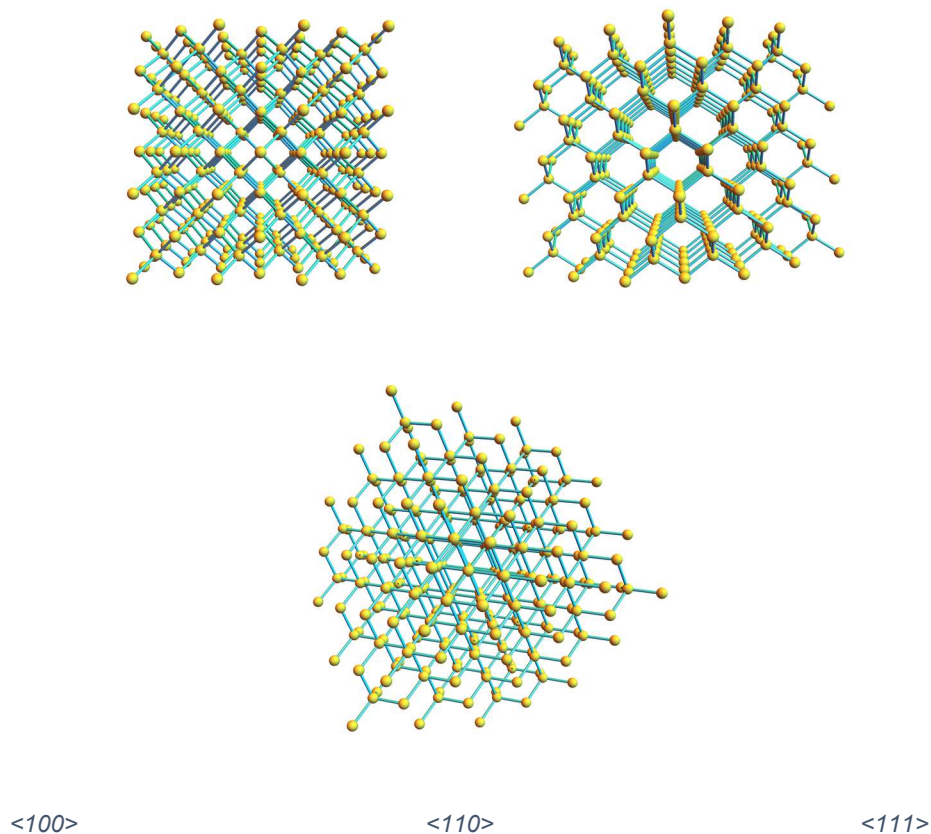
## 2.2. A szilícium mechanikai és kristálytani tulajdonságai

A szilícium a periódusos rendszer 14-es rendszámú eleme, kb.  $1400^\circ\text{C}$  fokig szilárd halmazállapotú. Négy vegyértékű, így a kristályrácsában minden atomnak négy legközelebbi szomszédja van, ezek a vegyérték elektronok segítségével kapcsolódnak össze. Elemi cellája egy felületen középpontos, köbös szerkezet, amelybe egy hasonló szerkezet van beleágyazva a testátló irányában  $1/4$  rácsállandóval eltolva. Ez a gyémántrács, amelynek a szilícium a kiváló mechanikai tulajdonságait köszönheti. Az elemi cellát és a szilícium legfontosabb kristálysíkjait a 2-1. ábra mutatja. A szilícium rácsállandója, azaz az elemi cellájának (2-1. ábrán látható kocka) élhossza  $0,357 \text{ nm}$ , ami azt jelenti, hogy az egykristály szilícium rácsában az egyes szilícium atommagok egymástól kb.  $5 \text{ \AA}$  távolságban helyezkednek el.



2-1. ábra Szilícium kristályrács elemi cellája, és a legfontosabb kristálysíkok

A rácsszerkezet a szilícium egyik legfontosabb tulajdonsága, mely meghatározza villamos és mechanikai paramétereit egyaránt. Jó félvezető alapanyagként csakis a kevés hibával rendelkező, egykristályos szilícium jöhet számításba. A szilícium egy fontos tulajdonsága, hogy egyes kristálytani irányokban a gyártástechnológia során másképp viselkedik (például különböző az adalékatamok behatolási mélysége), ezért nem mindegy, hogy milyen orientációjú a szeletünk (azaz a szelet felületét melyik kristálytani sík alkotja). A három leggyakrabban használt orientáció kristálysíkjait a 2-1. ábra mutatja be. Egyes lúgos marószerkek pl. lényegesen gyorsabban marják az  $\langle 100 \rangle$  kristálysíkokat, mint az  $\langle 111 \rangle$  síkot, amelyet alakzatok marására szokás kihasználni. Bipoláris integrált áramkörökhöz előszeretettel használnak  $\langle 111 \rangle$ -es orientációjú szeleteket, mivel ezeken a szeleteken könnyebben és gyorsabban növeszthető epitaxiális réteg. CMOS áramkörök gyártásához azonban elterjedtebb az  $\langle 100 \rangle$  orientációjú szeletek, mert ezeknél az ionimplantálás (2.7.2. fejezet) végezhető el könnyebben.



2-2. ábra A szilícium kristályrács különböző kristálytani irányokból nézve

Ha a szilícium mechanikai tulajdonságait tekintjük, akkor az 1. táblázatból láthatjuk, hogy egy rendkívül kemény és nagy szakítószilárdságú anyagról van szó. Sűrűsége ezzel ellentétben igen alacsony. Összehasonlításképpen láthatjuk, hogy annak ellenére, hogy könnyebb, mint az alumínium, szakítószilárdsága meghaladja a titánét. Ezen tulajdonsága miatt előszeretettel alkalmazzák mikromechanikai rendszerekben alapanyagként. Egyetlen rossz mechanikai tulajdonsága a ridegsége, melynek következtében már igen csekély alakváltozás esetén is törik, amelyet a mikrorendszerek tervezésekor figyelembe kell venni.

Ezzel szemben a megengedett tartományon belüli tartós és ismételt igénybevétel esetén sincs szerkezeti, illetve szilárdsági változás, vagyis sem rugalmatlan alakváltozás, sem pedig fáradás nem lép fel. További jó fizikai tulajdonságai közé tartozik a viszonylag magas hővezetése, ami megkönnyíti a szilíciumból készült chipek hűtését.

1. táblázat Különféle anyagok mechanikai tulajdonságai

	Keménység (Mohs skála)	Young modulus [GPa]	Sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ]	Hővezetés [W/(m·K)] @ 300 K	Hőtágulás [μm/(m·K)]
Alumínium	2,7	70	2,7	237	23,6
Réz	3	110-130	8,93	398	16,5
Nikkel	4	200	8,91	90,5	13,3
Vas	4	196	7,87	80,3	11,8
Rozsdamentes acél	5,5–6,0	200	7,9	32,9	17,3
Molibdén	5,5	343	10,22	138	4,8
Titán	6	102,7	4,5	21,9	8,6
Szilícium	7	130	2,33	148	2,5
Volfrám	7,5	410	19,25	178	4,6
Szilícium-nitrid	9	250-325	3,2	30,1	2,9
Szilícium-karbid	9,2	302	3,2	360	4,8
Gyémánt	10	1220	3,5	900 - 2320	1

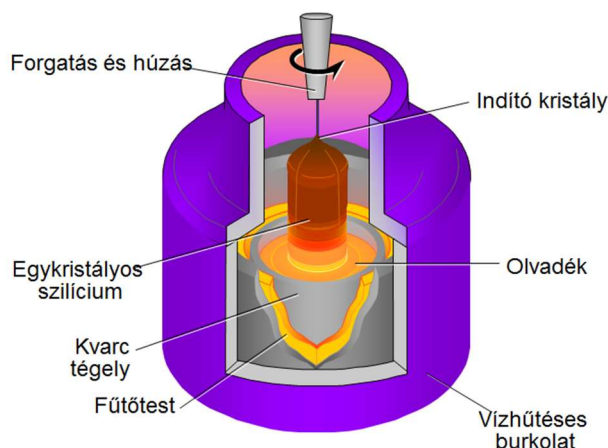
Felvezető-gyártástechnológiai szempontból különösen fontos, hogy a szilícium felületén egyszerűen alakítható ki szilícium-dioxid réteg, amelynek elektromos és mechanikai tulajdonságai kiválóak. A szilícium-dioxid (azaz a kvarcüveg) kiváló szigetelő, jól tapad a szilícium felületére. A felületen tömör védőréteget képez, amely mechanikai behatásoknak és a hidrogén-fluorid kivételével vegyszereknek is jól ellenáll, ezért használható kiváló maszkoló réteggént. Az említett hidrogén-fluorid egy szelektív marószert, csak magát a szilícium-dioxidot marja, a szilíciumot azonban nem. Ezen tulajdonságok tették lehetővé a szilícium alapú planártechnológia gyors fejlődését és elterjedését.

### 2.3. Egykristályos szilícium szelet előállítása

A szilícium alapú félvezető gyártástechnológia alapja a kellően tiszta, megfelelő orientáltságú, kristálytani hibáktól lehetőleg mentes egykristályos szilícium szelet. A szilícium szeletek előállításához először létre kell hoznunk magát az egykristályos szilícium tömböt a rendelkezésre álló polikristályos alapanyagból. A polikristályos kristályszerkezetű anyag a gyakorlatban leggyakrabban apró méretű egykristály darabkákból (kristallitokból) épül fel. Integrált áramkörök elkészítésére nem alkalmas. IC-k készítésére alkalmas egykristályos szilícium előállítására az iparban két elterjedt eljárást alkalmaznak, a Czochralski féle kristályhúzást, illetve a zónás újrakristályosítást. Mind a két eljárás egy egykristályos szilícium tömböt eredményez, amelyből huzalfűrésszel és a felület polírozással állítják elő a megfelelő felületi orientációjú és szinte atomosan sík felületű szilícium szeleteket. Léteznek olyan eljárások is, ahol rögtön szelet formájában állítják elő a szilíciumot, az ilyen szeleteket azonban jellemzően csak a napelemipar alkalmazza, és nem felelnek meg az integrált áramkörök szigorú gyártástechnológiai követelményeinek.

#### Czochralski egykristály növesztési eljárás

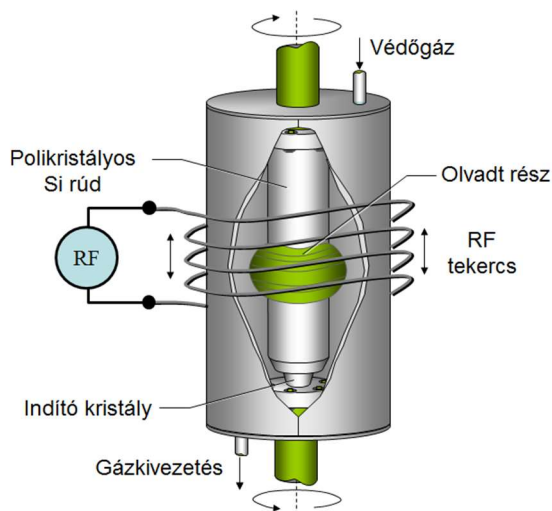
Első lépésben polikristályos Si-ot olvasztanak meg egy kvarc tégelyben. (Si olvadáspontja  $1414^{\circ}\text{C}$ .) Ezt követően az olvadékba egy meghatározott orientációjú indítókristályt helyeznek, majd állandó forgatás közben meghatározott húzási sebességgel (0,5-1,2 mm/perc) mozgatják felfelé. A húzási sebesség az egykristályrúd átmérőjét határozza meg. Az olvadékot már ekkor adalékolják n vagy p-típusú adalékkal, így az elkészült egykristály rúd meghatározott típusú és orientációjú lesz.



### Zónás újrakristályosítás

Az adalékolt polikristályos rudat ebben az esetben egy lassan mozgó tekercssel induktív módon olvasztják meg, majd a részek, amelyeken a tekercs túlhaladt újra megszilárdulnak, de ekkor a már szilárd részekhez kristályosodnak hozzá, és követik a szilárd fázisok orientációját, így a teljes rud egy azonos fázisú, egykristályú alakítható át. A rud orientációját it is egy indítókristállyal határozzák meg.

Ez a módszer alkalmazható a Czochralski-féle kristályhúzással készült egykristályrud további tisztítására is, kihasználva az anyagok szegregációját az olvadt és a szilárd fázisok között. Az adalékanyagok homogén módon kerülnek a szilárd fázisba, míg a szennyező anyagok inkább az olvadt fázisban maradnak. Ezáltal a szennyező atomok a rud végébe kerülnek, amelyet egyszerűen levágnak.

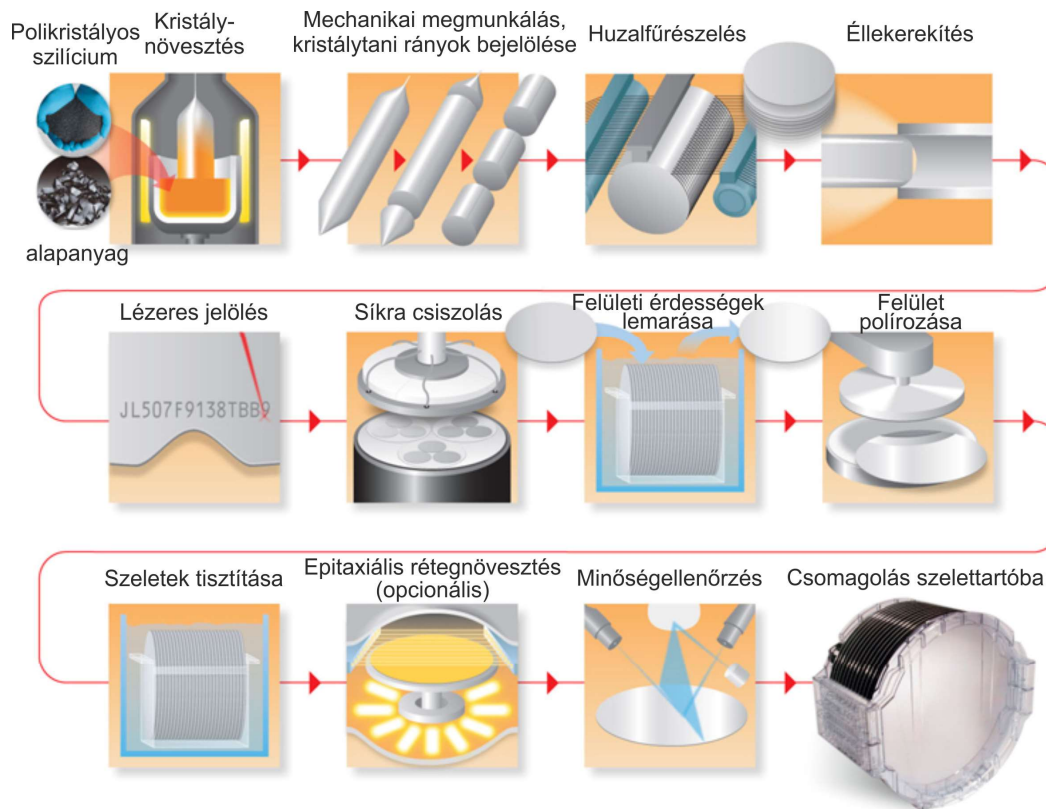


2-4. ábra Zónás újrakristályosítás

#### 2.3.1. A szilícium szelet előállítása

Mint korábban említettük, az alapanyag gyártása során először egykristályos szilícium tömböket készítenek, majd ezeket felfűrészelve állítják elő a megfelelő vastagságú szeleteket. Ahhoz, hogy a fűrészelés utáni szeletekből integrált áramkörök készítésére alkalmas alapanyag legyen, az egyes szeleteknek azonban még számos megmunkálási fázison kell átesniük. Egy tipikus szeletelőállítási technológiai sort mutat be a 2-5. ábra.





2-5. ábra Szilícium szelet előállítása [2]

A kristályhúzás (1) során kapott egykristályhengereket (öntecseket) először feldarabolják rövidebb darabokra (2), majd meghatározzák az alapanyag kristálytani irányait, és ennek megfelelően belecsiszolnak a palástfelületükbe egy vagy kettő sík felületet ("flat"), vagy nagyobb átmérők esetében egy hornyot ("notch"). Ezek a jelölések arra szolgálnak, hogy a kész szeletek IC-gyártásban történő felhasználásakor akár ránézésre is be lehessen azonosítani az egyes kristálysíkokat és az adalékolásuk típusát.

Ezt követi a tömbök szeletelése, jellemzően huzalfűrészeléssel (3). A huzalfűrészelésnél egy gyémántrészecskékkal ellátott huzallal vágják fel a szilíciumtömböt, miközben természetesen gondoskodnak a megfelelő hűtésről is. A huzalfűrés előnye, hogy megfelelő vezetőtárcsákkal vagy vezetőhengerekkel, a huzallal sok párhuzamos vágást végezhet egyszerre, ami gyorsítja a vágási folyamatot. A szelet átmérőjétől függően a szeleteket különböző vastagságúra vágják, jelenleg a legvékonyabb szeletvastagságok 100-150  $\mu\text{m}$  között mozognak, ezeket azonban általában csak napelemek előállítására használják (az integrált áramkörök gyártásánál használt szeletméretekhez tartozó vastagságokat lásd lentebb). Ezen vastagságok alatt már nagyon gyakori a szeletek törése a vágás során, ezért jelenleg a 100  $\mu\text{m}$ -es vastagságot tekintik a fűrészelés technológiai határának. A huzalfűrészelés másik hátránya, hogy a drágán előállított egykristályos anyagunknak a fűrészelés során számottevő része elvész. Minél vékonyabbak a szeletek, annál jelentősebb részét teszi ki a vágási szélesség a szeletelendő anyagnak, így még igen vékony huzalok esetén is jelentős veszteségek keletkeznek. Az integrált áramkörök készítésére manapság használt 300 mm átmérőjű szeletek esetében a 0,7-0,8 mm-es szeletvastagságnak



köszönhetően ez a fűrészelési veszteség még elfogadható, azonban 150  $\mu\text{m}$  vastag napelemalapanyagok esetében a vágási veszteség elérheti az 50 %-ot is.

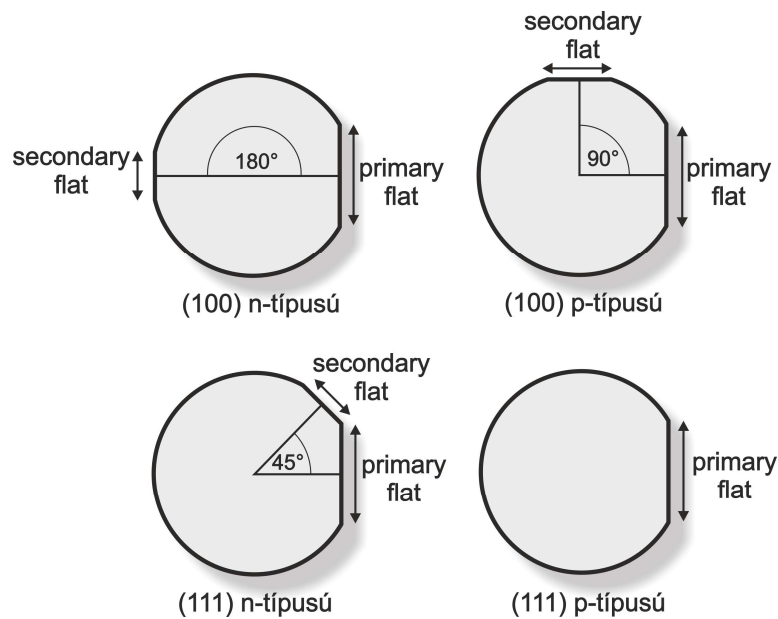
A tömbök felszeletése után következik a szeletek élének lekerekítése (4), majd az egyes szeletek azonosítóinak gravírozása lézerrel (5). Kisebb átmérőjű (2, 3, 4 inch-es) szeleteken inkább csak egyes sorozatokat jelölnek egyértelműen beazonosíthatóan. A jelenleg használt, 300 mm-es átmérőjű szeletek azonban már önmagukban is jelentős értéket képviselnek, ezen felül pedig rengeteg integrált áramkör alakítható ki egy szeleten, így minőségbiztosítási okokból minden egyes szeletet egyértelmű azonosítóval látnak el.

A fűrészeléssel nem lehet teljesen sík, azaz mindenhol egyenletesen vastag szeleteket előállítani. Ráadásul a fűrészeléستől karcolások maradnak vissza a szeletek felületén. Ahhoz azonban, hogy jó integrált elemeket tudjunk kialakítani, a szilícium szelet felületének szinte tökéletesen síknak kell lennie. Amennyiben a szeletek érdessége összemérhető az áramköri elemek legkisebb jellemző méreteivel, akkor az azonos alkatrészek között óriási szórások alakulnak ki, és az áramkörünk gyakorlatilag használhatatlan lesz. Korszerű gyártástechnológiáknál a legkisebb méretek 10 nm-es nagyságrendbe esnek, ezért a szeleteknek szinte atomosan síknak kell lenniük (egy atomnyi távolság kb. 0,5 nm). Ehhez a szeletek többlépcsős polírozási folyamaton mennek keresztül. Az első, pusztán mechanikus megmunkálási lépésben síkba csiszolják a szeleteket (6), ekkor eltűnnek a felületről a fűrészelésből visszamaradt karcolások. A második lépésben kémia marással lemarják a síkbacsiszolás által keletkezett, finomabb repedéseket karcolásokat (7), majd ezt követi a végső, együttes mechanikus és kémiai polírozás (CMP – chemical-mechanical polishing), amellyel eltávolítják a legapróbb felületi érdességeket és esetleg visszamaradt szemcséket (8). Ezen utolsó lépés már úgy nevezett tisztatérben történik (3.3. fejezet).

Az elkészült szeleteket ezután különböző tisztítási folyamatoknak vetik alá (9), ezt követi szintén tisztatéri körülmények között a szeletek minőségellenőrzése (11) elektronikus és optikai mérőműszerekkel (3. fejezet). Ezt követően megfelelő méretű szelettartóba helyezik (12), és légzáróan becsomagolják a szeleteket, amelyek így felhasználásra készen érkeznek az IC- gyártóhoz.

### **Szilícium szeletek orientációja**

A félvezető iparban csak meghatározott orientációkban készítik el az egykristályos Si szeleteket. A lehetséges orientációk közül általában kétfélét használnak: az **<100> orientációt alkalmazzák, MOSFET és MEMS (Micro-Electromechanical Systems) eszközök esetén, a <111> orientációt pedig bipoláris eszközök esetén részesítik előnyben.**



2-6. ábra Különböző orientációjú szeletek

Az elkészült Si rudakon mielőtt szeletelnék, megjelölik a fő kristálytani irányt (primary flat), valamint ahhoz, hogy a későbbiekben az adalékolás típusát is könnyen meg lehessen határozni érintésmentesen, alkalmaznak egy másodlagos bevágást (secondary flat). Ezek egymáshoz viszonyított helyzetét szemlélteti a 2-6. ábra.

### Szilícium szeletek méretei

A kristálynövesztési technológiák fejlődésével az iparnak egyre nagyobb átmérőjű kristálytömböket sikerült előállítania. Az egyre nagyobb átmérőjű szeleteken egyre több chip helyezhető el, így egyre több chip gyártható egyszerre, ami jelentősen csökkenti a gyártásköltségeket. A jelenleg legfejlettebb gyártástechnológiák 300 mm átmérőjű szeleteket alkalmaznak, egyes gyártók régebbi, nagyobb csíkszélességű technológiáiknál azonban még 150, illetve 200 mm-es szeletméretekkel dolgoznak. A következő tervezett szeletméret a 450 mm, amelyet a jelenlegi előrejelzések szerint 2018-ban fognak bevezetni.



Átmérő	2"	4"	6"	8"	12"
Vastagság [μm]	275	525	675	725	775

2-7. ábra Különböző méretű szilícium szeletek [3]

Ahhoz hogy a szeletek a technológiai folyamatok alatt ne törjenek el, a szilícium szeletek átmérőinek növekedésével a szeletek vastagságát is növelni kell.

## 2.4. Kristályhibák

Az egykristályhúzás során nagymennyiségű oxigén, szén, hidrogén és különböző fém atomok kerülnek a Si tömbbe. A gyártástechnológia későbbi lépéseiben, például különböző reaktív anyagokat (például DRAM kialakításnál  $\text{SF}_6$ ) használó technológiai műveletek során is szennyezők jutnak a szilícium egykristályba. A bejutott különféle szennyezők és adalékatomok a kristályrács eldeformálását és különféle kristályhibák megjelenését okozzák. Az adalék valamint a szennyező atomok alapvetően három féle képpen épülhetnek be és okozhatnak kristályhibákat az egykristályrácsban:

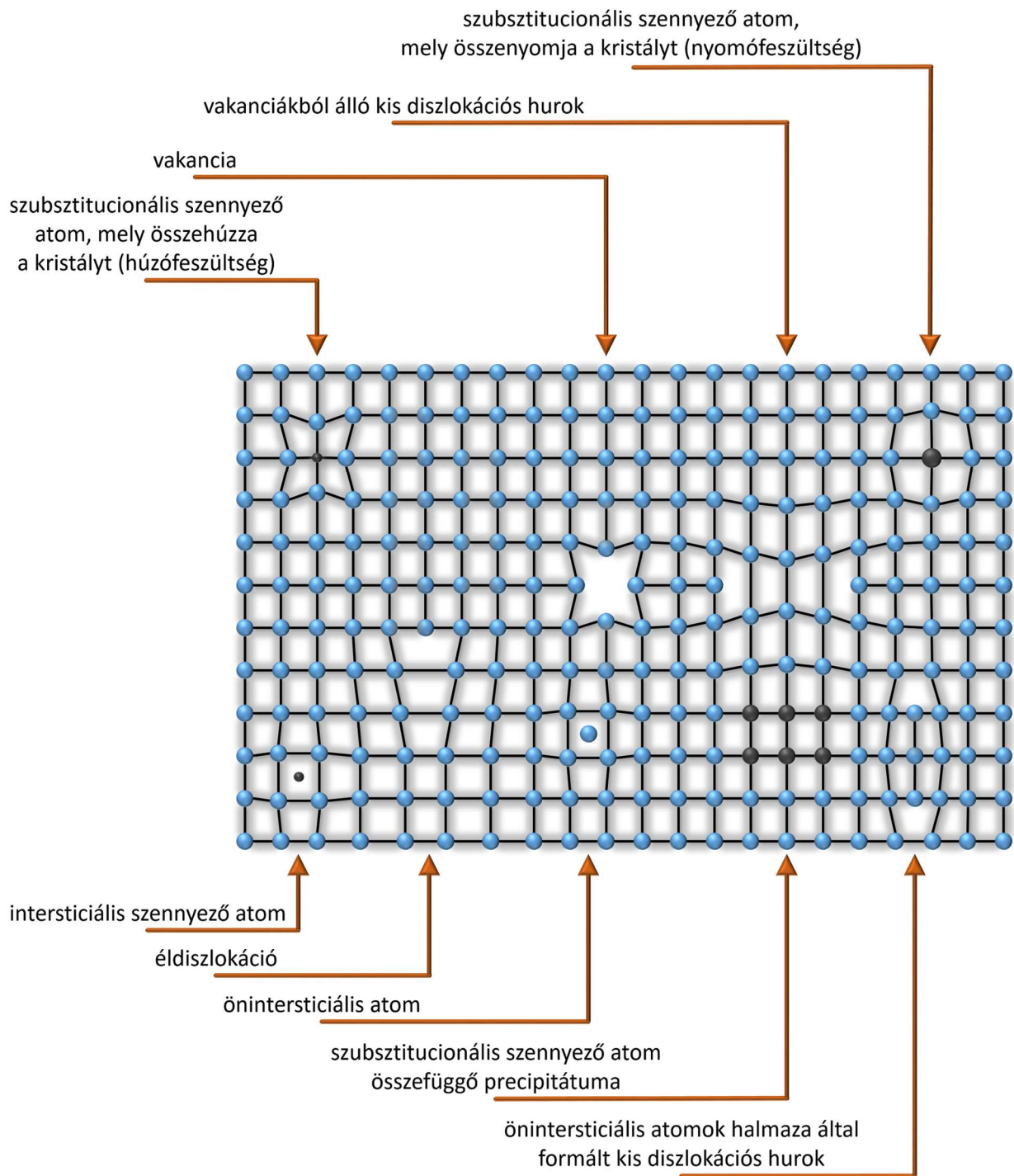
1. Szubsztitúció: A szennyező atom egy szilícium atom helyére (kristályrácspontba) ül be.
2. Intersticiális: Az adalék- vagy szennyező atom nem a rácspontba ül be.
3. Vakancia: Szennyező atom hatására a szilícium atom hiányzik a rácspontból.

A létrejövő kristályhibák lehetnek:

- Egydimenziós hibák  
Úgy nevezett ponthibák keletkezhetnek például magától a Si atomokból fakadóan, amikor az atom nem rácspontba ül be (intersticiális  $\text{Si}_i$ ), vagy egy adott rácspontból hiányzik, mely vakanciát okoz ( $\text{Si}_v$ ). Mindezek mellett a Czochralski eljárás során a tégelyből származó  $\text{O}_i$  atomok is képesek intersticiálisan elhelyezkedni a rácsban. Ismeretes még, hogy a grafit szuszceptorból szén atomok a rácsba a Si helyére szubsztitúciósan ülnek be ( $\text{C}_s$ ), valamint a fém szennyezők intersticiálisan és szubsztitúciósan is elhelyezkedhetnek (metal,  $\text{M}_{i,s}$ ) a rácsban.
- Kétdimenziós hibák  
Tipikus kétdimenziós a diszlokáció. Diszlokáció alakulhat ki, amikor sok intersticiális Si épül be egy vonal mentén például epitaxiális rétegnövesztés esetén. A diszlokációk egy egész atomsor, vagy egy teljes sík eltolódását eredményezhetik.
- Térbeli hibák  
A kezdetben intersticiálisan beült oxigén atomok a hőkezelések hatására szubsztitúciós szennyezővé válnak, később pedig egy részük

hibakomplexeket, vagy precipitátumokat (kiválás) alkotnak. Oxigén donorok esetén az ilyenféle többdimenziós hibák  $\text{SiO}_x$  komplexeket eredményeznek.

Bővebb magyarázat nélkül a 2-8. ábrán számos további egy-, illetve kétdimenziós hiba látható, ahol a kék színű atomok Si atomokat ábrázolnak, míg a kisebb, ugyanakkora és nagyobb méretű fekete színű atomok a méretnek megfelelő tömegszámú atomokat jelentenek.



2-8. ábra A Si-egy kristályban előforduló hibák

## 2.5. A szilícium szennyező és adalék atomjai

Amint láttuk az előállított egykristályban ideális esetben csak Si atomok foglalnak helyet a gyémántrácsban. A szilícium szeletek gyártása során azonban az egykristályba más atomok is bekerülnek.

Egy részüket **szándékosan** visszük be, azért, hogy megváltoztassuk például az alapanyag vezetési tulajdonságait. Ezeket **adalékoknak** nevezzük és tipikusan III. és V. vegyértékű atomok pl. B, P, As, felhasználásával történik.

Más atomok (tipikusan C, Fe, O) a kristálynövesztés alatt kerülnek bele rácsba, de mivel jelenlétük nemkívánatos, ezért **szennyezőknek** hívjuk őket.

### Mit okoznak a szennyezők?

A ponthibák nem annyira veszélyesek a kialakított áramkörökre. Azonban, amint az írtuk a gyártástechnológiai hőkezelések nagyobb méretű hibakomplexeket eredményezhetnek. A hibák egyrészt az adott térrész elektromos paramétereinek megváltozását okozzák. Például a szilíciumban lévő vasatomok mélynívókat hoznak létre a Si tiltott sávjában, és így jelentősen csökkentik a kisebbségi töltéshordozók élettartamát. A p-típusú adalékokkal ugyanis már szobahőmérsékleten is párokat alkotnak. Ezekből a hőkezelések hatására precipitátumok alakulnak ki. Másrészt a magas oxigéntartalom a precipitátumok növekedésével a szelet görbületét is okozhatják. Ez pedig a fotolitográfia során az elemek mérettorzulását okozza.

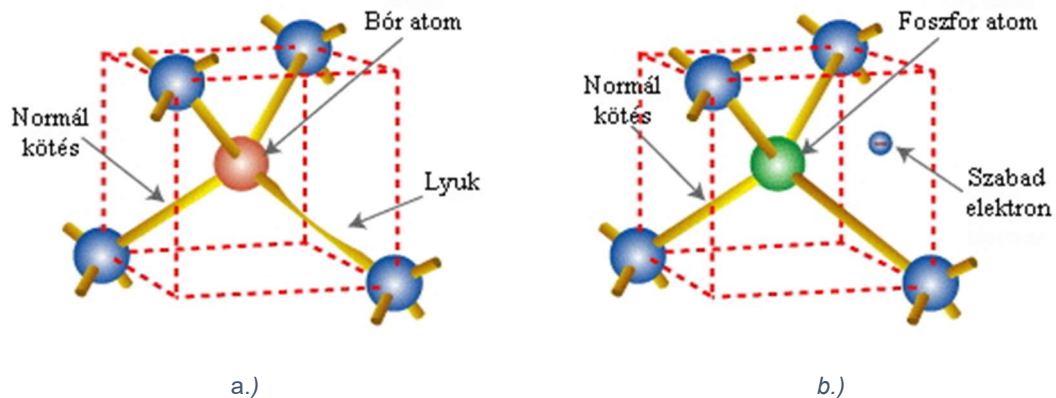
### Hogyan védekezhetünk a szennyezőkkel szemben?

Ha teljesen egzakt megfogalmazást szeretnénk, akkor azt kéne mondanunk, hogy lehetetlen elérni, hogy egyetlen szennyező atom se kerüljön az egykristályos szilícium szeletünkbe. Mindezek ellenére, azonban elfogadható mértékűre csökkenthetjük a „nemkívánatos” atomok számát. Azt tudjuk, hogy a gyártás során mindenképpen kerülnek be szennyező atomok, vagyis a szeletünkben úgymond, mint veleszületett tulajdonság jelen lesznek. Számunkra ideális lenne, ha abban a rétegben (általában a felső 2-30  $\mu\text{m}$ -ben), ahol az áramköreink elhelyezkednek, mégsem lennének jelen. Ezért egy belső getterezési eljárással (félvezető szelet felületét védőanyagokkal kezelik) a szelet belsejében mesterségesen alakítunk ki hibahelyeket, amelyeket hőkezelésekkel hibakomplexezzé alakítunk. A megfelelő hőkezelési ciklusok alkalmazásával elérhető, hogy ezek a nagyobb méretű komplexek a kialakult erőtér következtében magukhoz vonzzák a kisebb hibákat. Ezáltal elérhető, hogy a szelet felső rétege, amelyben az áramkörök elhelyezkednek, hibamentes legyen.

### Adalékok

Az adalékolatlan (intrinsic) Si fajlagos ellenállása szobahőmérsékleten elég nagy 250  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ . A vezetőképességet ugyan javíthatjuk, ha emeljük a hőmérsékletet (ugyanis a termikus generáció következtében növekszik a töltéshordozók száma), de ez nem célravezető megoldás. Adalékokat használhatunk, a periódusos rendszer III. főcsoportjából (B, Al, Ga, In, tipikusan a bórt használjuk). Ezeknek az atomoknak 3 vegyértékelektronja van, így a rácspontra ülve egy elektron hiány, vagy lyuk keletkezik. Az így keletkezett adalékolat szilíciumot „p-típusú” vagy akceptor adalékolat félvezetőnek nevezzük (2-9. a.) ábra). Amennyiben a periódusos rendszer V. főcsoportjából (P, As, Sb, de tipikusan a foszfor) használunk elemeket, amelyeknek 5 vegyértékelektronja van, akkor a rácspontra ülve egy

elektron többlet fog keletkezni. Az így keletkezett adalékolt szilíciumot „n-típusú” vagy donor adalékolt félvezetőnek nevezzük (2-9. b.) ábra). Az intrinsic anyagban az elektronok és a lyukak aránya megegyezik  $n_i=p_i=10^{10}$  atom/cm<sup>3</sup>. Az adalékolás során ezt az arányt kell elmozdítani úgy, hogy a donor vagy akceptor alapanyagok adalékolása tipikusan kb.  $10^{15}$  atom/cm<sup>3</sup> legyen. Az adalékolásnak a szilárd oldékonyság szab határt, melynek maximális értéke kb.  $\sim 10^{21}$  atom/cm<sup>3</sup>.

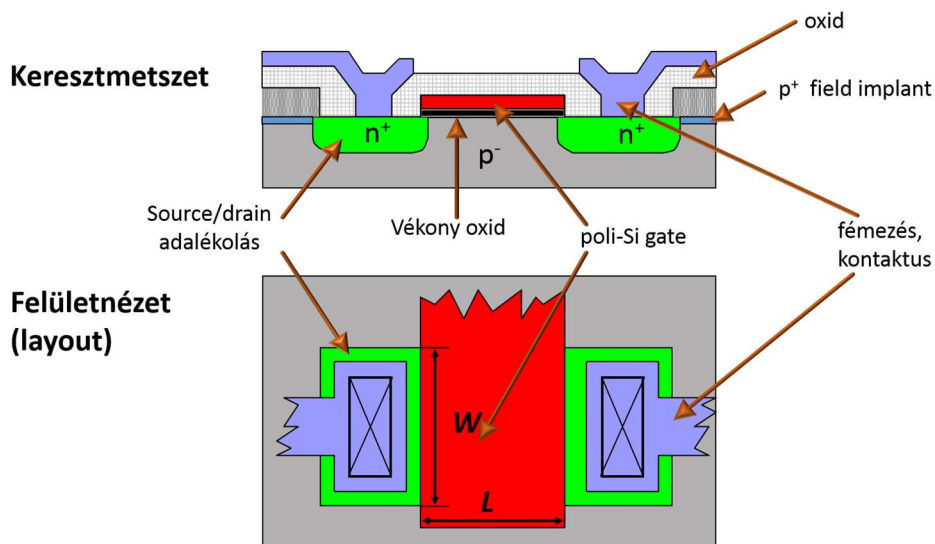


2-9. ábra „p-típusú” és „n-típusú” szilícium

## 2.6. Az egykristályos szilícium szelet kialakítását követő alapvető gyártástechnológiai lépések

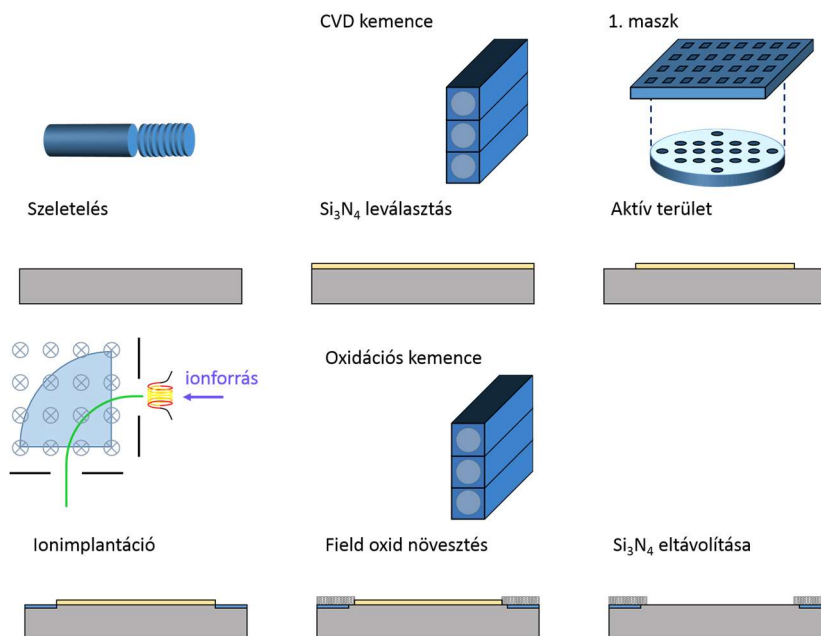
Azt követően, hogy kialakítottunk egy n vagy p-típusú Si szeletet, adott mintázatnak vagy topológiának (úgynevezett layout rajzolatnak) megfelelően tranzisztorokat és egyéb félvezető elemeket szeretnénk kialakítani, elhelyezni a szeleten, melyet később megfelelő mintázatban létrehozott fémvezetékekkel kapcsolnánk össze. A tranzisztorok kialakításához azonban a szelet adott pontjaiban, lokálisan meg kell változtatnunk az alapanyag anyagi tulajdonságait: bizonyos régiókat erősebben kell adalékolni, illetve szigetelő vagy vezető rétegeket kell felvinni a szelet tetejére. Ahhoz, hogy lássuk, hogy mennyi különféle régiót kell kialakítani a szilícium szeleten példaként nézzük meg a 2-10. ábrát, melyen egy alap n csatornás, növekményes MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) látható.

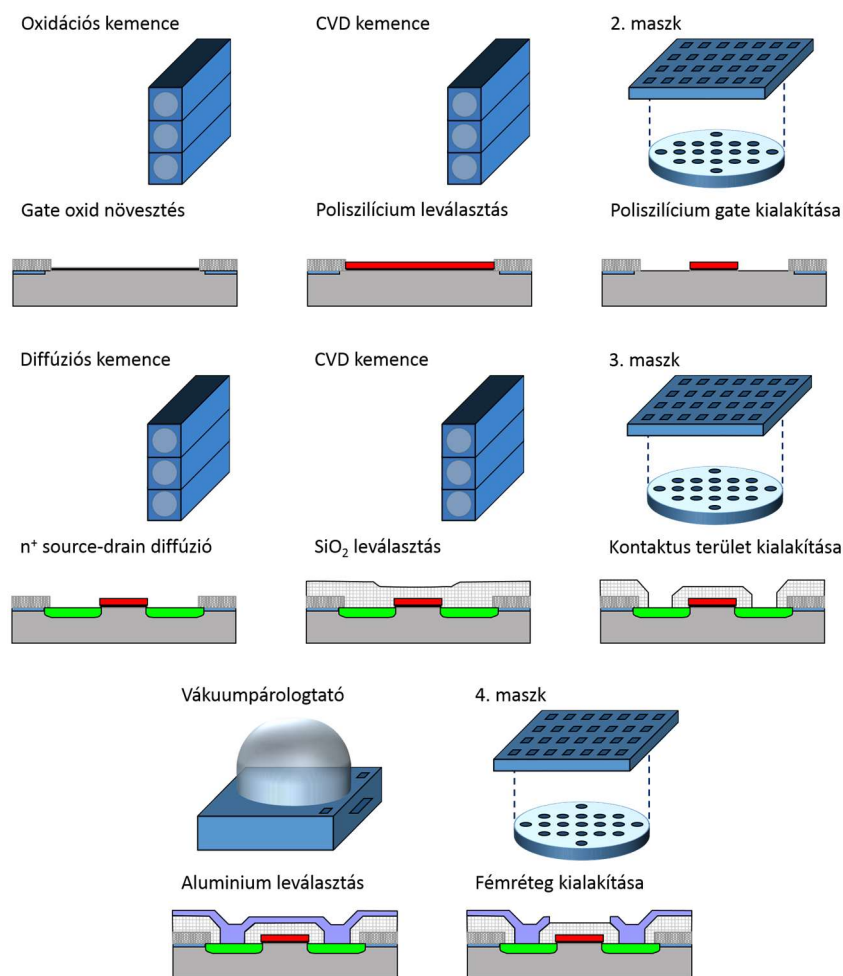




2-10. ábra MOSFET felülnézete és keresztmetszete

Azt, hogy csak adott helyeken adalékoljuk a szeletet vagy válasszunk le rá különböző (oxid, fém, stb.) rétegeket különféle maszkolási technikákkal értjük el. Ennek lényege, hogy egy maszkkal vonjuk be a szeletet, mely védi - vagy pont nem fogja védeni - az adott helyen a szeletet a külső behatástól (adalékolás, UV fénnel történő megvilágítás, marás stb.). Mivel azonban egyféle maszk nem áll ellen az összes megmunkálás lépésnek, továbbá mivel minden réteg másik mintázatot igényel, ezért a gyártás során több, különféle mintájú és anyagú maszkot használunk. Mindegyik maszkkal más és más megmunkálási lépést végzünk el, melyeket az egyes fázisok között kicserélünk. A maszkolás fontossága jól látható a 2-11. ábrán, mely a MOS IC-k gyártásának egyszerűsített lépéseit mutatja be.





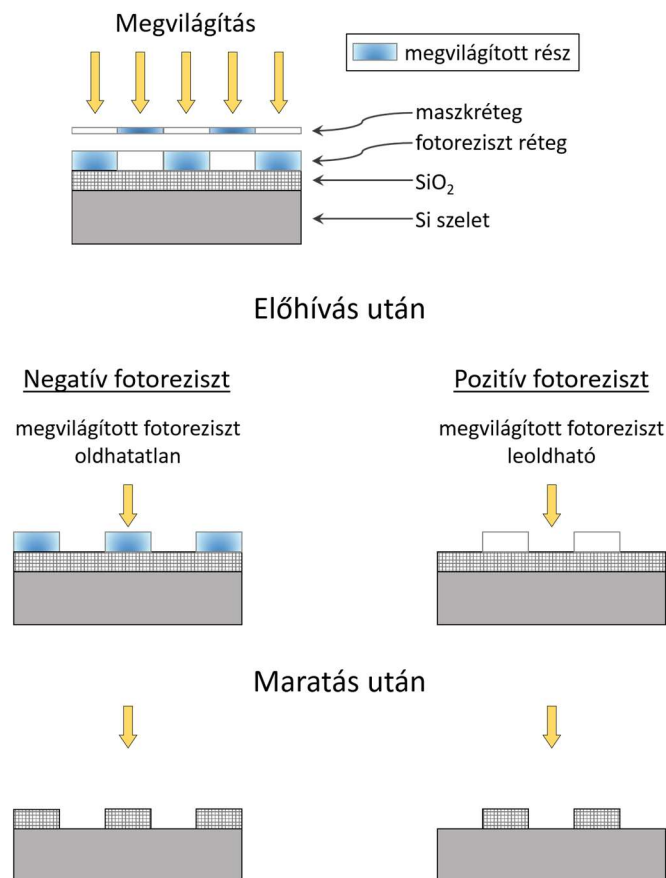
2-11. ábra MOSFET előállításának egyszerűsített lépései

Amint látható számos gyártástechnológia lépés szükséges, ahhoz, hogy a szilícium szeleten létrehozzunk egy tranzisztort. A méretek csökkenésével számos további lépést is be kellett vezetni, hogy a nagyobb méretben még elhanyagolható, de a nanométeres mérettartományban már számottevő, parazita, illetve másodlagos effektusok ellenére is működőképes tranzisztorokat tudjuk előállítani. Ezek nagyrésze ma még ipari titoknak számít és a gyártók csupán apróbb utalásokat szoktak adni arra vonatkozóan, hogy milyen technológiai újításokat vezettek be [4][5][6]. Az alapvető és gyártástechnológiai meghatározóbb lépéseket (**fotolitográfia, adalékolás: diffúzió és ionimplantáció**) azonban érdemes külön részletezni.

## Fotolitográfia

Az alakzat kialakításának egyik módja a nedveskémiai technológiában a fotolitográfia. Ennek során egy fotoreziszt anyagot viszünk fel a szelet felületére megfelelő vastagságban. Ennek a szerves anyagnak az oldhatósága erősen lecsökken, vagy nagymértékben javul UV fénnel való megvilágítás hatására. **Negatív lakkok** amelyek megvilágítás hatására oldhatatlanná válnak, míg a **pozitív lakkok** – éppen ellenkezőleg – a fény hatására

oldhatóvá válnak. A megvilágítást egy maszkon keresztül végezzük, amely tartalmazza a kialakítani kívánt struktúra mintázatát. (2-5.ábra)



2-12. ábra A fotolitográfia lépései negatív és pozitív lakk esetén

## 2.7. Adalékolás

Alapvetően két féle adalékolási eljárást különböztetünk meg. Egyiknél a magas hőmérsékletre hevítés hatására felgyorsuló, koncentrációgradiens következtében létrejövő, anyagáramlást használjuk ki. Ez alatt azt értjük, hogy a felületre jutott nagy koncentrációjú (jelen esetben n vagy p-típusú) adalékanyagunk magas hőmérsékleten bediffundál a szilícium szeletebe ezáltal - a maszkolás következtében - lokálisan erősen adalékolts régiókat hozva létre. Másik módszer az ionimplantáció, melynek során nagysebességű ionokkal bombázzuk a felületet, így juttatva be az adalékatomokat a szelet belsejébe.

### 2.7.1. Diffúzió

A diffúzió olyan anyagáramlás, amely koncentrációkülönbség hatására jön létre. Amennyiben az egyik anyag koncentrációja egy másik anyagban a hely függvényében változik, az adott anyag a nagyobb koncentrációjú helyről az alacsonyabb koncentrációjú hely felé áramlik. Ezt a transzportfolyamatot nevezzük diffúciónak. A félvezető technikában gyakran alkalmazzuk a diffúziós technikát p-n átmenet vagy n<sup>+</sup>, illetve p<sup>+</sup> régiók létrehozására.

A diffúzió általános mechanizmusát a Fick-törvények írják le.

$$j = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (2-2)$$

ahol:  $j$ - egységnyi keresztmetszeten egységnyi idő alatt áthaladó atomok száma

$D$  – diffúziós állandó

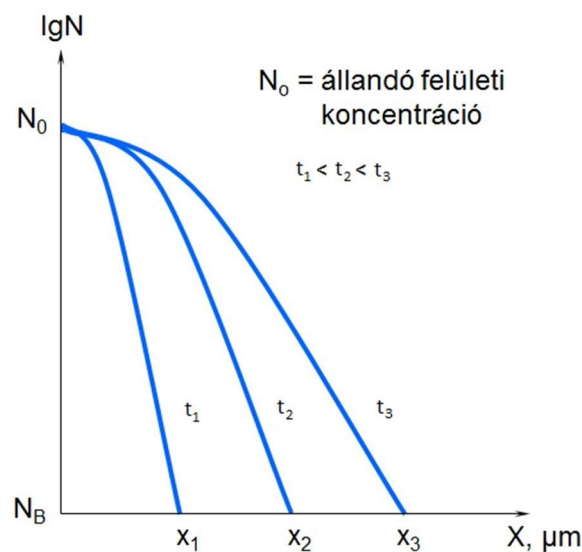
$N$  – adalék atomok koncentrációja

$t$  – diffúziós idő

$x$ - a felülettől mért távolság

A félvezető technológiában két alapvető diffúziós eljárást alkalmaznak.

### Állandó felületi koncentrációjú adalékolás



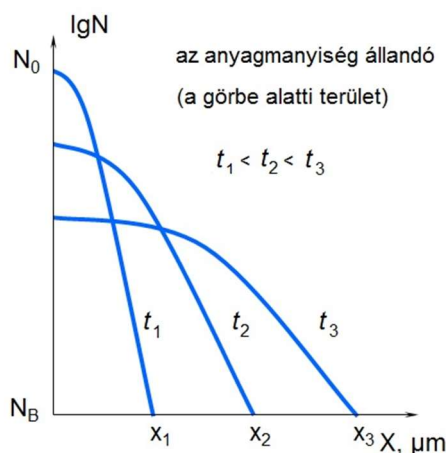
2-13. ábra Állandó felületi koncentrációjú adalékolás

Ebben az esetben valamilyen diffúziós forrás segítségével biztosítjuk, hogy a felületi koncentráció állandó legyen. A forrás lehet szilárd, folyadék vagy gáz halmazállapotú. A félvezető gyártás szempontjából kedvező, legjobban szabályozható és a legegyszerűsebb eloszlást gáz halmazállapotú adalékkal lehet elérni. Az adalékkoncentráció hely- és időfüggését a Fick egyenletekből lehet számolni.

$$N(x, t) = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \quad (2-3)$$

$N_0$  a felületi adalékkoncentráció,  $N_B$  a hordozó szilícium koncentrációja.

### Állandó anyagmennyiség diffúziója



2-14. ábra Állandó anyagmennyiségű adalékolás

Állandó anyagmennyiséget feltételezve a Fick egyenletek megoldásaként az alábbi egyenletet kapjuk:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right)^2 \right] \quad (2 - 4)$$

ahol  $Q$  - az egységnyi felületen felhalmozott adalék atomok száma.

Ebben az esetben már bevitt adalékatomokat juttatják a kívánt mélységbe. A 2-14. ábrán látható, hogy mivel az adalékatomok mennyisége már nem változik, ezért a felületi adalékkoncentráció csökken.

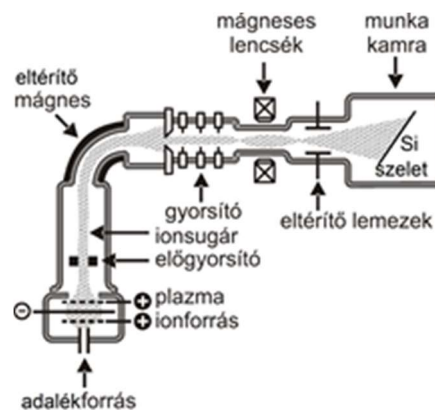
$N_0$  az induló felületi adalékkoncentráció,  $N_B$  a hordozó szilícium koncentrációja.

A gyakorlatban a p-n átmenetek diffúzióval történő kialakítására a kétlépéses diffúziót alkalmazzuk. Az első lépésben egy állandó felületi koncentrációjú ún. elődiffúziót kell csinálni, amelyet alacsony hőmérsékleten (1000-1100 °C) hajtunk végre. A második lépésben egy magas hőmérsékletű (kb. 1200 °C) diffúzió készül, amikor az elődiffúzió során a Si szeletbe került adalékokat megfelelő mélységbe juttatjuk. Ezt a lépést oxigén gázban végezzük, így a felületen fog  $\text{SiO}_2$  réteg növekedni. Ezt nevezzük behajtásnak. Az adalékanyagoknak eltérő a diffúziós állandójuk a szilíciumban, így a kívánt profil elérése, külön tervezést igényel. Mindezek mellett, figyelni kell a tervezésnél arra is, hogy a korábbi lépések során bevitt adalékok szintén tovább fognak diffundálni. Ez igaz minden hőkezelési lépésre is, így törekedni kell arra, hogy egyre alacsonyabb hőmérsékletű lépéseket alkalmazzunk a technológiai lépések előrehaladtával.

### 2.7.2. Ionimplantáció

Az ionimplantáció olyan eljárás, melynek során direkt fizikai behatással módosítjuk az anyagok elemi tulajdonságait. Az eljárás során a bejuttatni kívánt adalékatomokat először egy ionforrásban ionizáljuk, majd egy elektromos téren áthaladva, a felgyorsított ionokkal bombázzuk a szilárd anyagot, hogy őket bejuttassuk a szelet belsejébe. Az eljárás alkalmazása igen széleskörű. A hétköznapi életben használt tárgyakat általában N-, Mo-, Ti-, Co- stb. ionokkal bombázzák azért, hogy a kopásállóságuk, illetve az élettartamuk megnövekedjen. Ilyen eszközök lehetnek pl. szerszámacélok, vagy akár protézisek is, melyek élettartamát ionimplantációval könnyen megduplázhathatjuk, de extrém esetben akár százszorosára is megnövelhetjük. A félvezető iparban a szilícium alapanyagban alkalmazott adalékok bejuttatására használhatjuk ezt az eljárást.

Az ionok behatolásának mechanizmusa elsősorban az energiájuktól és a folyamatban szereplő valamennyi atom tömegének arányától függ. Mivel az implanterek zömében az ionokat tömegszeparátoron is átvezetik, az adalékatomok nyalábja akár spektroszkópiai tisztaságú is lehet. Az ionok behatolásának mértékét alapvetően a gyorsítófeszültség szabja meg. Ionimplantációval tehát szabályozható mélységi eloszlást lehet elérni. Az energia változtatásával lényegében tetszőszerinti mélységi profilok állíthatók elő, tehát olyanok is, amelyek kizárólag termikus diffúzióval elképzelhetetlenek (például olyan eloszlás, ahol a koncentráció a felülettől befelé növekszik).



2-15. ábra Ionimplanter sematikus felépítése

Az ionimplantáció során a részecskék fékeződésekor az átadott energia következtében a rácspontokon lévő Si atomok elmozdulnak, így a rács kristálytani szempontból károsodást szenved. Ezért az implantáció után mindig egy helyreállító hőkezelés szükséges, amely során a rács visszanyeri eredeti szerkezetét és az adalékok is rácsponti helyre kerülnek. A félvezető alkalmazásoknál a dózisok a  $10^9$  ion/cm<sup>2</sup> -től  $10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> -ig terjednek.

### 2.8. Ajánlott irodalom

- [1] Székely Vladimír, **Elektronika I. – Félvezető eszközök**, Műegyetem Kiadó, 2001
- [2] SunEdison Semiconductor, **Semiconductor wafer manufacturing**, <http://www.sunedisonsemi.com/index.php?view=wafer-solutions&l1=25&l2=155>

- [3] Samsung, **Eight Major Steps to Semiconductor Fabrication, Part 1: Creating the Wafer**, <https://news.samsung.com/global/eight-major-steps-to-semiconductor-fabrication-part-1-creating-the-wafer>
- [4] Kelin J. Kuhn, Mark Y. Liu and Harold Kennel, **Technology Options for 22nm and Beyond**, 2010 International Workshop on Junction Technology (IWJT), Sanghai, China pp. 1-6, 2010
- [5] K. Mistry, et al., **A 45nm Logic Technology with High-k+Metal Gate Transistors, Strained Silicon, 9 Cu Interconnect Layers, 193nm Dry Patterning, and 100% Pb-free Packaging**, IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM 2007, Washington, USA, pp. 247-250, 2007
- [6] S. Natarajan, et al., **A 32nm Logic Technology Featuring 2<sup>nd</sup>-Generation High-K + Metal-Gate Transistors, Enhanced Channel Strain and 0.171 $\mu\text{m}^2$  SRAM Cell Size in a 291Mb Array**, IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM 2008, San Francisco, USA, pp. 1-3, 2008
- [7] Giber János, Vargáné Josepovits Katalin, Gyulai József, Biró László Péter, **Diffúzió és implantáció szilárdtestekben**, Műegyetemi Kiadó, 1997