

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

FÉLVEZETŐ ANYAGOK JELLEMZŐI, FÉLVEZETŐ SZELET ELŐÁLLÍTÁSA

ELEKTRONIKAI ANYAGTUDOMÁNY

AZ ATOM FELÉPÍTÉSE – KLASSZIKUS MODELL

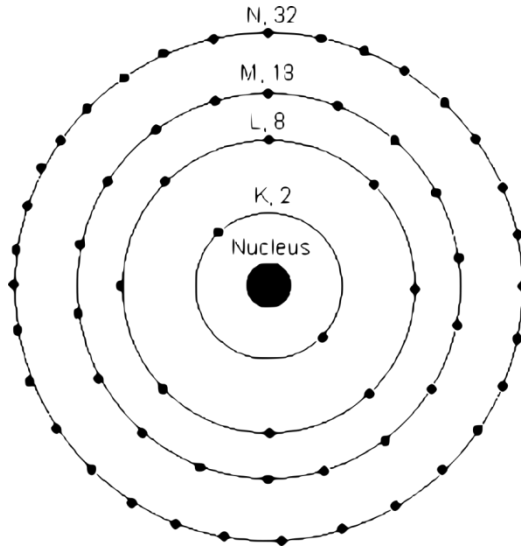
A Bohr féle atommodell

Az atomon belül az **elektronok** felelősek az atomok kémiai tulajdonságaiért, az egymással kialakított kötésekért és azok típusáért és erősségért.

Az elektronok a magtól adott távolságra, **elektronhéjakon** keringenek. Az elektronhéjat a **főkvantumszámmal (n)** jellemezzük. $n_K = 1$, $n_L = 2$, $n_M = 3$, $n_N = 4$...

A héjon lévő elektronok száma:
 $2n^2$ azaz: 2, 8, 18, 32...

Az elektronok energiája a magtól távolodva folyamatosan nő.



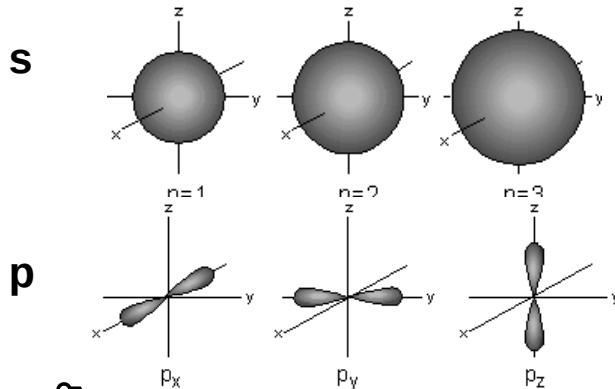
AZ ATOM FELÉPÍTÉSE – KVANTUM MODELL

A kvantummechanikai atommodell

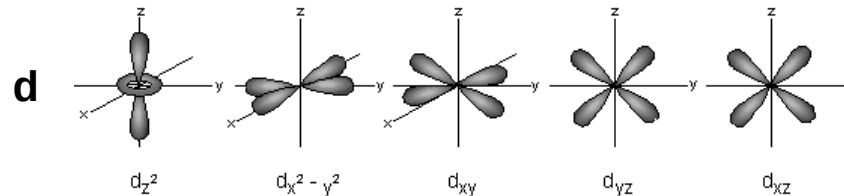
Elektronpálya (atompálya): az a térrész, amelyen az elektron megtalálási valószínűsége 90%.

Alhéj: azonos nagyságú és alakú elektronpályák. s, p, d és f alhéjakat különböztetünk meg, a **mellékkvantumszám (l)** jellemzi őket ($n-1 \geq l \geq 0$).
(sharp, principal, diffuse, and fundamental)

Elektronhéj: az atommagtól azonos távolságra lévő pályák összessége (K, L, M, N). Az elektronhéjat a **főkvantumszám (n)** jellemezzük.



Mágneses kvantumszám (m): az alhéjon belül lehetséges pályák megkülönböztetésére szolgál ($l \geq m \geq -l$).



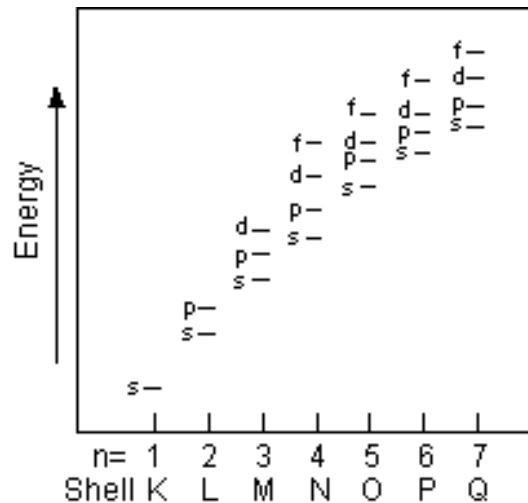
AZ ATOM FELÉPÍTÉSE – KVANTUM MODELL

A kvantummechanikai atommodell

Pauli kizárási elv: egy atom két elektronjának nem lehet teljesen ugyanaz minden kvantumszáma $\rightarrow$ minden alhéjhoz (vagyis adott n és l -hez) 2 db elektron tartozik, különböző **spinkvantumszámmal** ($s = 1/2$ vagy $-1/2$).

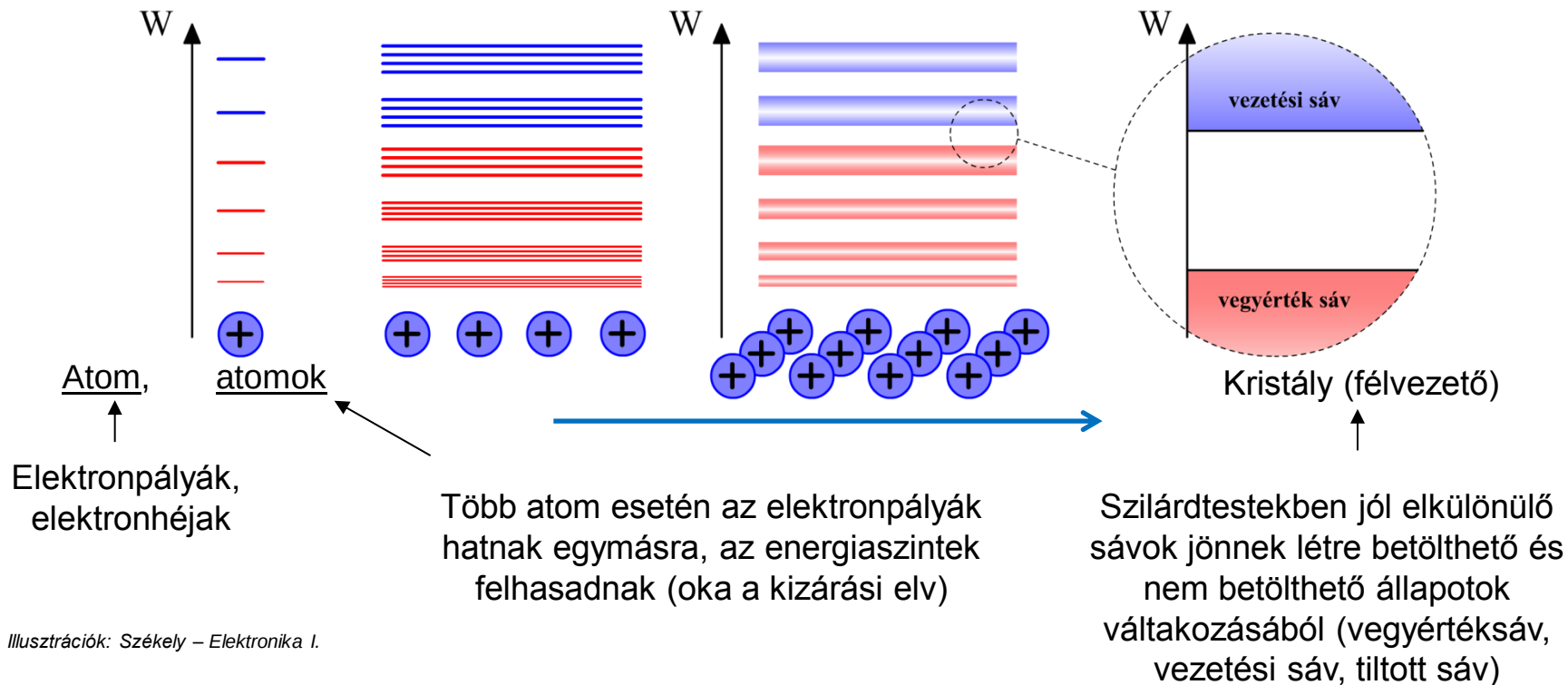
Megfigyelhető, hogy az elektronpályák energia szerinti betöltése n és l vonatkozásában nem monoton!

Kémiai szempontból a **mellékvantumszám** kiemelt fontosságú, mivel ez adja meg a kialakuló pályák alakját, ami hatással van az atomok között létrejövő kémiai kötésekre és azok szögére.



AZ ANYAGOK ELEKTRONSZERKEZETE

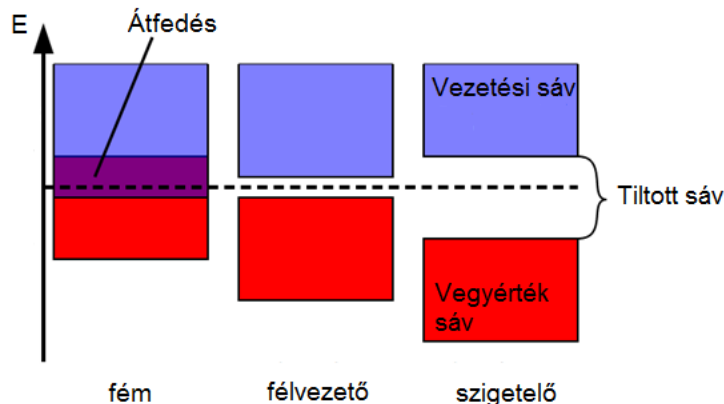
A sávszerkezet kialakulása



Illusztrációk: Székely – Elektronika I.

AZ ANYAGOK ELEKTRONSZERKEZETE

A különböző sávszerkezetek



- **Szigetelők:** $W_g > 2 \text{ eV}$
- **Félvezetők:** $W_g < 2 \text{ eV}$ (pl. Si: 1.1 eV, Ge: 0.67 eV, GaAs: 1.43 eV)
- **Vezetők:** nincs tiltott sáv, a vezetési és a vegyérték sávok „összeérnek”

KRISTÁLY DEFINÍCIÓI, KRISTÁLYTANI OSZTÁLYOK

Egykristály:

a periodikus ismétlődése tökéletes abban az értelemben, hogy az anyag teljes térfogatára kiterjed. (kristály széle = hiba)

Polikristályos:

(mikrokristályos), ha az anyag több (egy)kristály szemcséből épül fel.

Amorf:

az atomok elrendeződésének hosszútávú periodikus ismétlődése hiányzik (csak rövidtávú rend létezik).

	Paraméter	Egyszerű	Tér-centrált	Alaplapon centrált	Lapon centrált
Triklin	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $a_{12} \neq a_{23} \neq a_{31}$				
Monoklin	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $a_{23} = a_{31} = 90^\circ$ $a_{12} \neq 90^\circ$				
Orto-rombos	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $a_{12} = a_{23} = a_{31} = 90^\circ$				
Tetra-gonális	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $a_{12} = a_{23} = a_{31} = 90^\circ$				
Tri-gonális	$a_1 = a_2 = a_3$ $a_{12} = a_{23} = a_{31} < 120^\circ$				
Köbös	$a_1 = a_2 = a_3$ $a_{12} = a_{23} = a_{31} = 90^\circ$				
Hexa-gonális	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $a_{12} = 120^\circ$ $a_{23} = a_{31} = 90^\circ$				

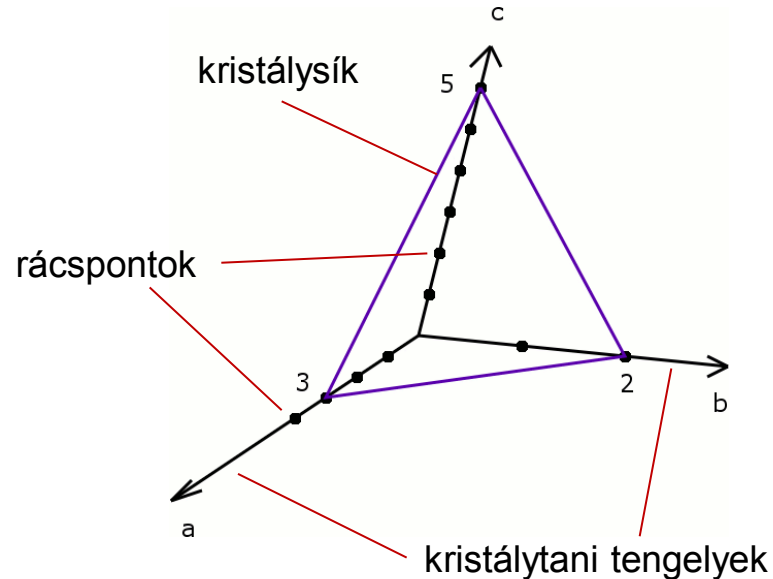
FIZIKAI PARAMÉTEREK – MILLER-INDEX

A h,k,l Miller-indexeket kristálysíkok, és ezáltal kristályorientáció azonosítására használjuk.

Pl.: „(100) GaAs kristály”

Meghatározása:

1. A síkok első metszéspontjai
rácsvektor egységeiben: 3,2,5
2. Reciprok értékek:
 $1/3, 1/2, 1/5$
3. Legkisebb, ugyanilyen arányú egész
számok
10,15,6



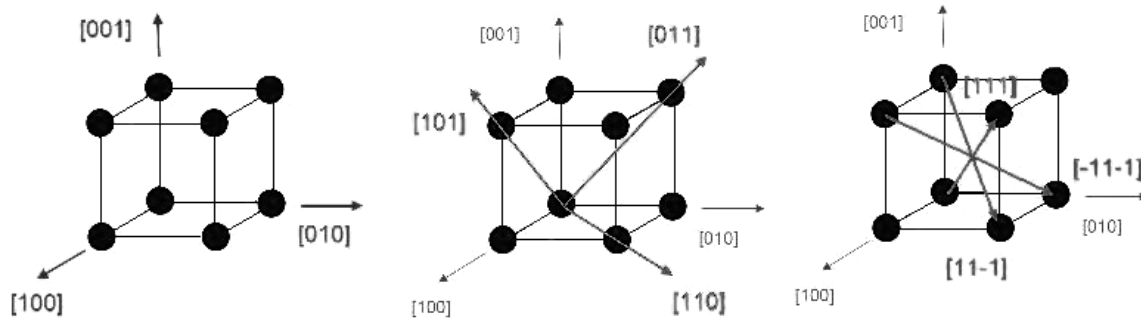
FIZIKAI PARAMÉTEREK – MILLER-INDEX

- Jelölések (nem összekeverendőek!)
 - $[]$ egy adott irány megadására (pl.: $[1,0,-1]$).
 - $\langle \rangle$ ekvivalens irányok halmazának megadására (pl.: $\langle 110 \rangle$).
 - $()$ egy adott sík megadására (pl.: (113)).
 - $\{ \}$ párhuzamos síkok halmazának megadására (pl.: $\{311\}$).

Pl.: „Az $[1\ 0\ 0]$ irány merőleges a $(1\ 0\ 0)$ síkra.”

FIZIKAI PARAMÉTEREK – MILLER-INDEX IZOTRÓP ÉS ANIZOTRÓP TULAJDONSÁGOK

- Irányok egyszerű köbös rácsban:



Az **egykristály** fizikai (termikus, mechanikai, elektromos, marási) tulajdonságai anizotrópak, azaz irányfüggőek.

A **polikristályos anyag**ban a kis egykristályok orientációja (általában) véletlenszerű, ezért átlagosan izotróp lesz. Pl. polikristályos Cu vezeték

ELEMI ÉS VEGYÜLETFÉLVEZETŐK, VALAMINT ADALÉKAIK A PERIÓDUSOS RENDSZERBEN

- Elemi félvezetők
IV. csoport (és vegyületeik)
C, Si, Ge, α -Sn, vagy pl. SiC
- Ezek adalékai:
 - Donorok
Több elektron
(V. csoport)
 - Akceptorok
Kevesebb elektron
III. csoport
- Vegyületfélvezetők:
 - III-V és II-VI csoportpárosokon belül

	III	IV	V	VI
	5 B Bór 10.811	6 C Szén 12.0107	7 N Nitrogén 14.0067	8 O Oxigén 15.9994
	13 Al Alumínium 26.98153...	14 Si Szilícium 28.0855	15 P Foszfor 30.973762	16 S Kén 32.065
30 Zn Cink 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germánium 72.64	33 As Arzén 74.92160	34 Se Szelén 78.96
48 Cd Kadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Ón 118.710	51 Sb Antimon 121.760	52 Te Tellúr 127.60
80 Hg Higany 200.59	81 Tl Tallium 204.3833	82 Pb Ólom 207.2	83 Bi Bismut 208.98040	84 Po Polónium (209)

FÉLVEZETŐK KRISTÁLYSZERKEZETE

Gyémánt, szilícium:

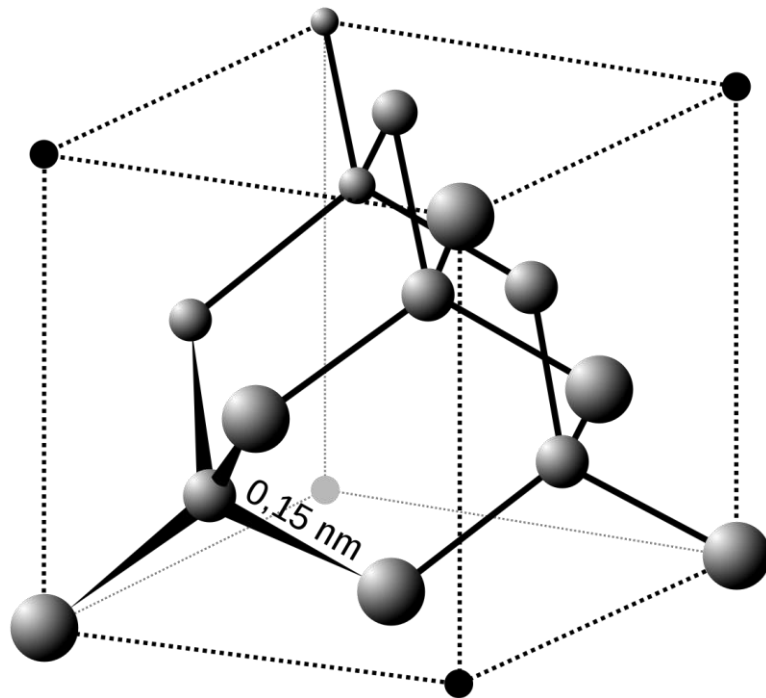
két lapcentrált köbös rács elcsúsztatva a térátló negyedével.

Az ún. „bázis” (atomi bázis) két egymás melletti atom.

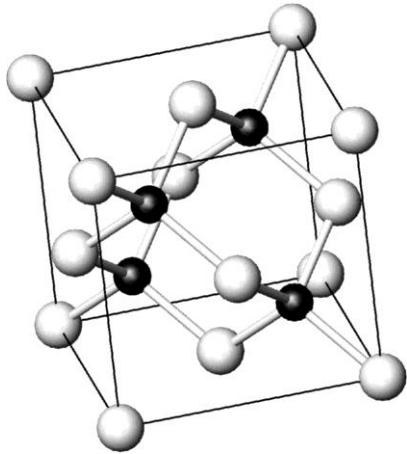
A rács lapcentrált köbös.

A kristály az atomi bázis eltolása minden lehetséges rácsvektorral.

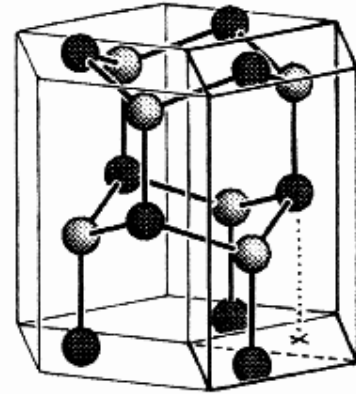
Elemi cella: egy kristály azon legkisebb geometriai egysége, amelynek három irányban való, önmagával párhuzamos eltolásával felépíthető a kristály.



FÉLVEZETŐK KRISTÁLYSZERKEZETE



Lapcentrált köbös, két különböző atomból álló bázissal (pl. GaAs):
a pozíciók azonosak a gyémántrácscsal, de itt váltakoznak az atomok 1:1 arányban.

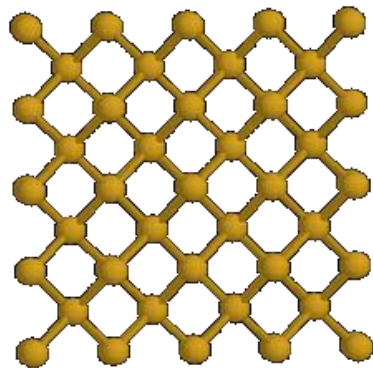


Hatszögös rács (pl.: GaN):
a kétféle atom külön-külön hatszögös rácsot alkot.

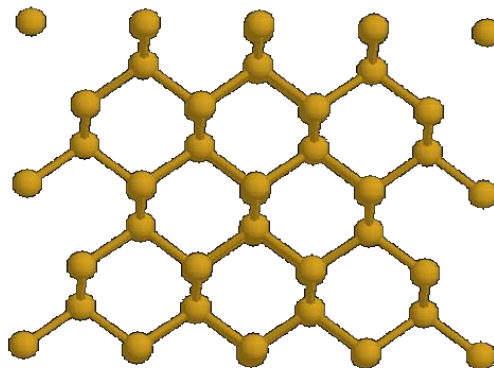
FIZIKAI PARAMÉTEREK – MILLER-INDEX

Si JELLEMZŐ ORIENTÁCIÓJA

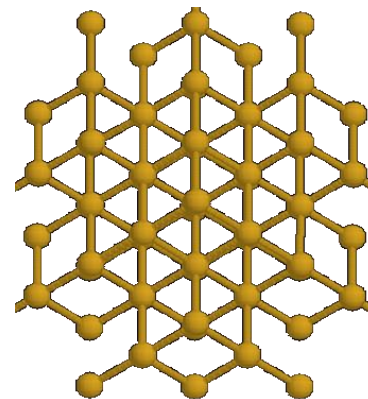
- Si kristály felhasználása meghatározza a kívánt orientációt:
 - CMOS: (100)
 - MEMS: (100) – az anizotróp maratás kihasználása érdekében! (111) irányban nagyon lassan maródik.
 - Bipoláris: (111)



100



110

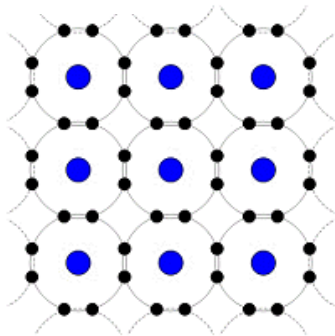


111

FIZIKAI PARAMÉTEREK – ADALÉKOLTSÁG HATÁSAI

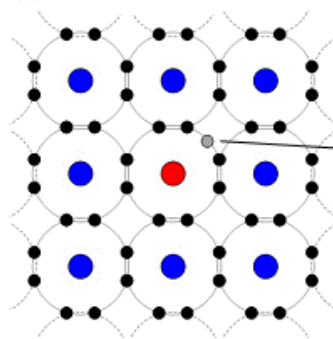
Tiszta Si

Si atom



n-Si

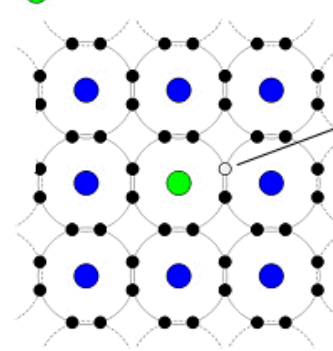
● P atom



többség
elektron
an extra electron.

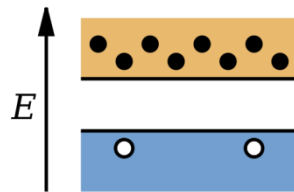
p-Si

● B atom

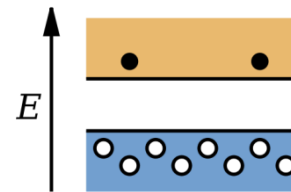


The boron
atom create
a hole. ○

elektron-
hiány



n-típusú adalékolás:
a többségi
töltéshordozók az
elektronok.



p-típusú adalékolás:
a többségi
töltéshordozók a
lyukak.

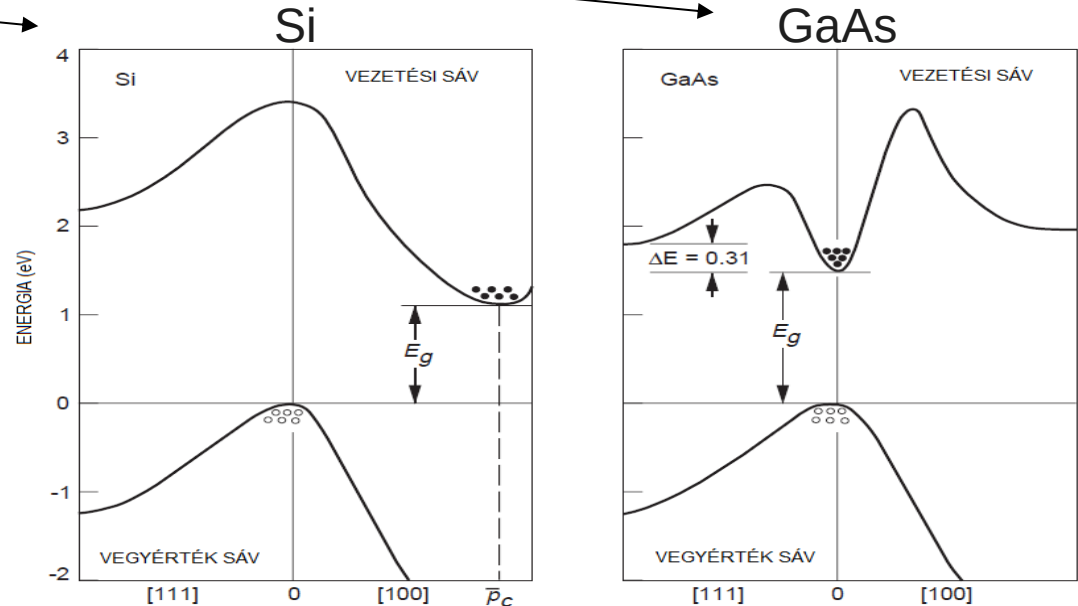
INDIREKT ÉS DIREKT SÁVSZERKEZET

Klasszikus energia-
impulzus reláció:

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

Kvantummechanika:

Kristályban a diszperziós reláció írja le a töltéshordozók energia-impulzus függvényét a különböző irányokban.



FÉLVEZETŐ ANYAGOK, TULAJDONSÁGOK

Elem/ vegyület	Tiltott sáv (eV)	Tiltott sáv (nm)	Tiltott sáv típusa
Gyémánt (C)	5,47 eV	227 nm	indirekt
Szilícium (Si)	1,11 eV	1127 nm	Indirekt
Germánium (Ge)	0,67 eV	1851 nm	indirekt
Gallium-arzenid (GaAs)	1,43 eV	867 nm	direkt

SZILÍCIUM-OXID TULAJDONSÁGAI

Szilícium-(di)oxid (SiO_2 , angol: silica), kristályos formája a kvarc.

Tulajdonságok:

- elektromosan szigetelő
gate dielektrikum
- alacsony hővezetőképesség
- olvadáspont: $1710\text{ }^\circ\text{C}$ ($> \text{Si}$)
- kémiai és mechanikai stabilitása kiváló
 - savak közül csak a hidrogén-fluorid oldja (csak ezzel mintázható!), emiatt maratás maszkanyaga
 - diffúzió és implantáció esetében is maszk



FIZIKAI JELLEMZŐK TÁBLÁZATBAN (Cu, Si, C, SiO₂)

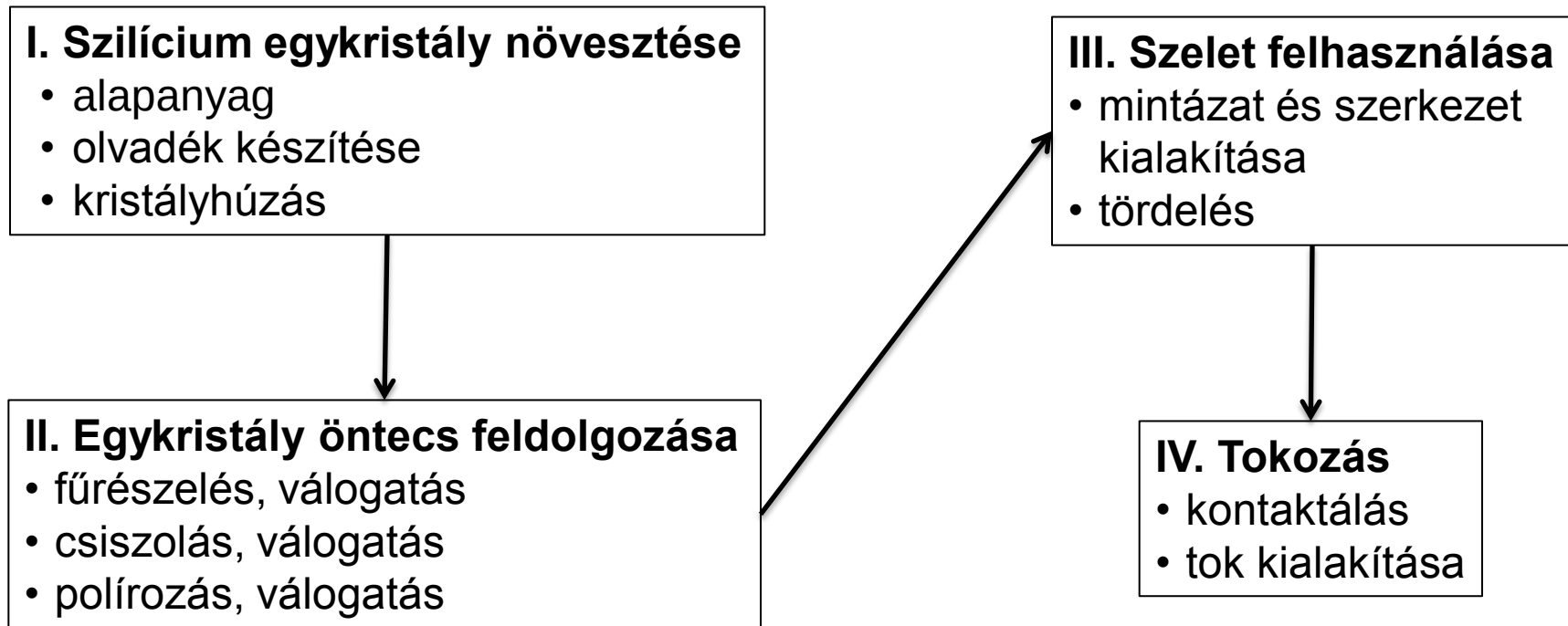
A félvezető gyártástechnológiában fontos anyagok összehasonlító táblázata

Anyag	Fajlagos ellenállás [Ωm]	Hővezetési tényező [W/(mK)]	Sűrűség [g/cm ³]	Formája a félvezető technológiában
Réz (Cu)	16,7x10⁻⁶	400	8,94	polikristályos
Szilícium (Si)	10 ³	150	2,33	egykristály (szelet), polikristályos (elektróda)
C (gyémánt)	10 ¹⁵ -10 ¹⁸	2000	3,52	polikristályos (CVD)
Szilícium-dioxid (SiO ₂)	10 ¹⁶	1,38	2,63	polikristályos

ÖSSZEFOGLALÁS – FÉLVEZETŐ ANYAGOK

- Az elektronszerkezet határozza meg a félvezető anyagok felhasználását.
- A kristályos anyagok speciális gyártástechnológiát igényelnek.
- Különböző anyagcsoportok (fémek, félvezetők, szigetelők) más-más paraméterei lényegesek: vezetőképesség, dielektromos állandó, hővezetés stb.
- A szilícium alapú elektronika fejlődését nagyban elősegítette, hogy a natív oxidja:
 - homogén,
 - kémiai szempontból ellenálló,
 - jó dielektrikum.

A CHIP GYÁRTÁSI LÉPÉSEI (ÁTTEKINTÉS)



SI EGYKRISTÁLY NÖVESZTÉSE

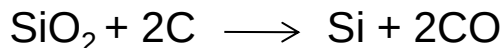
- 1. Alapanyag: kvarchomok (SiO_2)**
Tisztasági követelmények miatt speciális, Ausztrália partjáról
- 2. Polikristályos szilícium előállítása**
- 3. Olvadék készítése**
1600 °C-ra hevítve a poly-Si-t.
- 4. Öntecs húzása**
Olvadékból szilárdul meg, orientált kristálymag felhasználásával.
Domináns eljárás: Czochralski-módszer



http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/illustr/si_einkrist_inset.jpg
2,25x3,14x20x2,33 kg= 330 kg

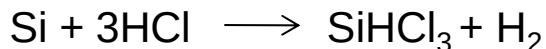
POLIKRISTÁLYOS Si KÉSZÍTÉSE

1. Homokból ívkemencében magas hőmérsékleten nyers Si



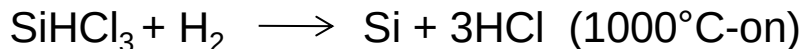
Ez a Si még szennyezett.

2. Nyers Si reagáltatása sósavval



A triklór-szilán gáz, könnyen desztillálható.

3. CVD eljárással Si leválasztása triklór-szilánból



Az utolsó lépésben keletkezett Si gőzfázisból válik ki egy pálcára (szintén Si). A tiszta olvadékot ebből a pálcából készítik.



POLIKRISTÁLYOS Si KÉSZÍTÉSE: „parts-per” ARÁNYSZÁMOK

- % százalék 10^{-2}
- ‰ ezrelék 10^{-3}
- ppm parts per million 10^{-6}
Egy csepp víz 50 literhez képest
- ppb parts per billion 10^{-9}
Egy csepp víz egy plafonig vízzel telt nappalihoz képest
- ppt parts per trillion 10^{-12}
Egy csepp víz 20 színültig töltött versenymedencéhez képest

Kis mennyiségű szennyezők mennyiségének, ritkán előforduló hibák gyakoriságának kifejezésére használjuk.

(pl. „A forrasztási hiba gyakorisága 500 ppm, azonnali közbeavatkozást igényel”)

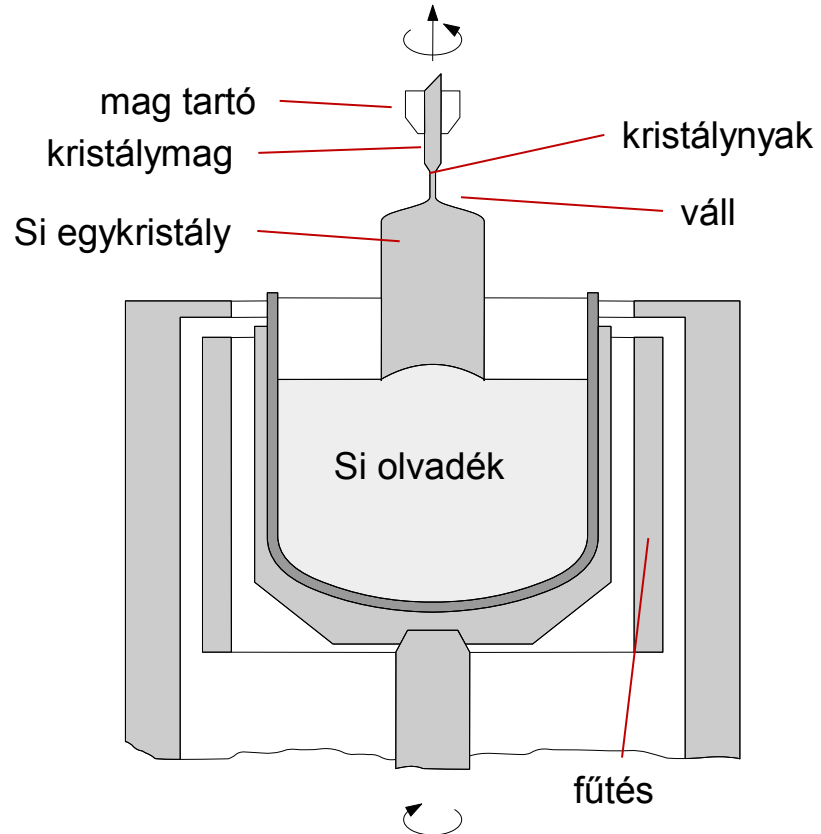
OLVASZTANDÓ Poly-Si JELLEMZŐI

jellemző	anyag	határ
szennyezettség	donorok (P, As,Sb)	<300 ppt (atom)
	akceptorok (B, Al)	<100 ppt (atom)
	szén	<200 ppb (atom)

- Adalékolás (*doping*): anyagok tudatos bejuttatása abból a célból, hogy a Si, vagy más félvezető sávszerkezetét a gyártandó eszköz működése szempontjából előnyösen megváltoztassuk. Pl.: p-Si-ban a bór (B) adalék.
- Szennyezés: olyan anyagok véletlenszerű bejutása, amelyek a működés szempontjából közömbös, vagy káros. Pl.: „tisztá” Si-ban a bór (B) szennyező.

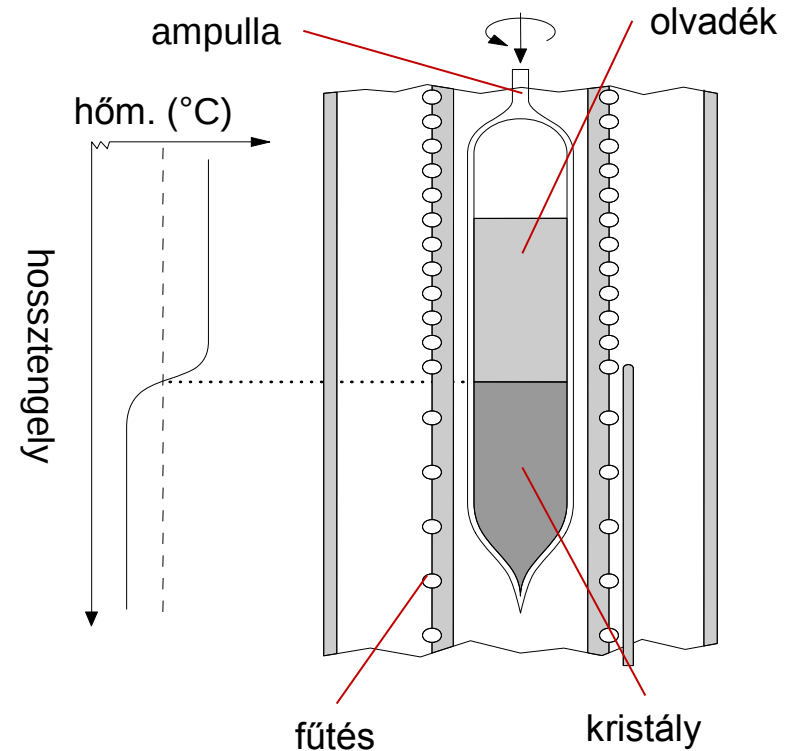
A CZOCHRALSKI ELJÁRÁS

- A Si olvadékából orientált kristálymaggal húzzuk a kristályt, forgatás közben.
- Lényeges paraméterek: hőmérséklet (olvadáspont: 1414 °C), forgatás sebessége
- Adalékolás megoldható gáz vagy folyadék fázisból.
- Szennyeződés mértéke alapján osztályozhatók.



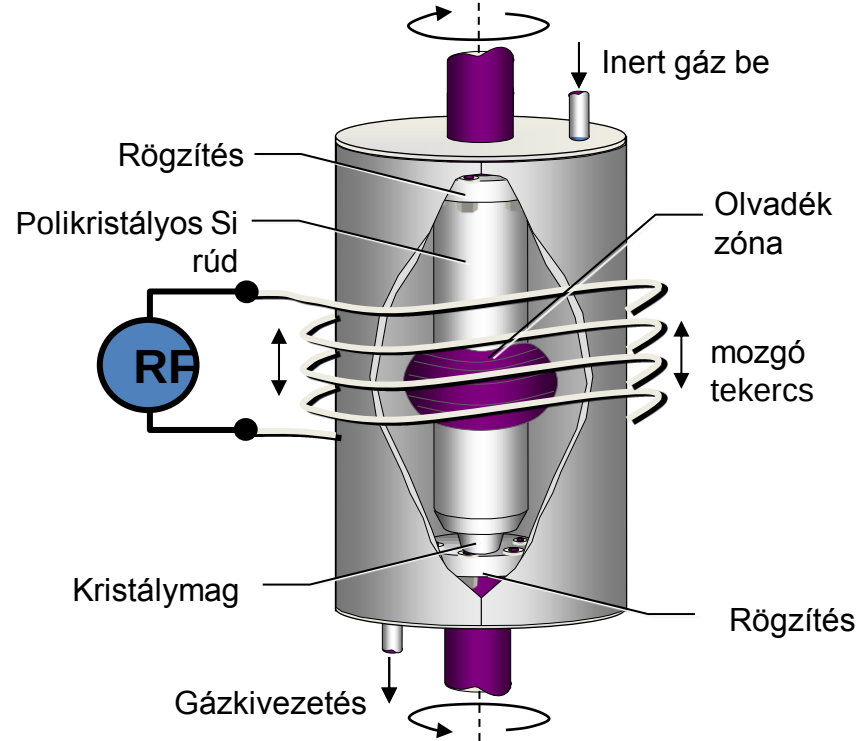
A BRIDGMAN-STOCKBARGER ELJÁRÁS

- Lezárt ampullát húzunk végig egy csökkenő hőmérsékletű zónán.
- Si esetében kevésbé használatos.



MOZGÓZÓNÁS („FLOATING ZONE” - FZ) ELJÁRÁS

- A polikristályos rudat lassan mozgó tekerccsel indukzív módon megolvasztunk.
- A lassú kristályosodás egykristályt eredményez.
- Tisztításra is használató.
pl.: zónás tisztítás
A fázisok közötti szegregációt használja ki.



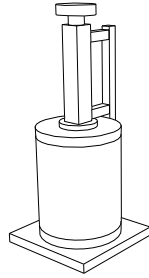
TISZTASÁGI KÖVETELMÉNYEK

ISO 14644-1 szabvány

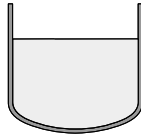
Osztály	Lebegő részecskék száma / m ³						FED STD 209E szerint
	≥0.1 μm	≥0.2 μm	≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥1 μm	≥5 μm	
ISO 1	10	2					
ISO 2	100	24	10	4			
ISO 3	1,000	237	102	35	8		Class 1
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83		Class 10
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	Class 100
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293	Class 1000
ISO 7				352,000	83,200	2,930	Class 10,000
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300	Class 100,000
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000	Szobai levegő

Si EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA

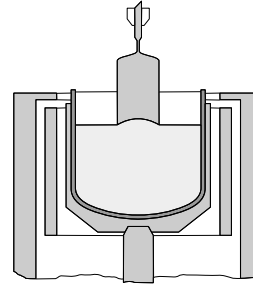
1. kvarc kályha
poly-Si-vel töltve



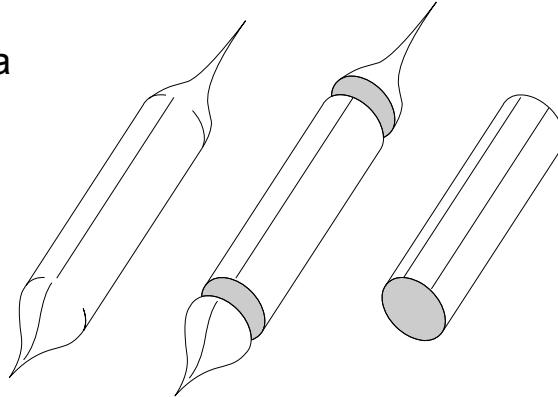
Si olvadék



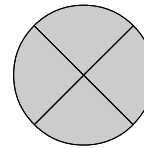
2. kristálynövesztés



3. öntecs formázása

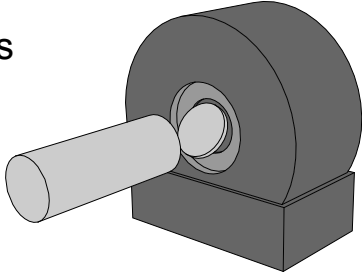


4. méretellenőrzés

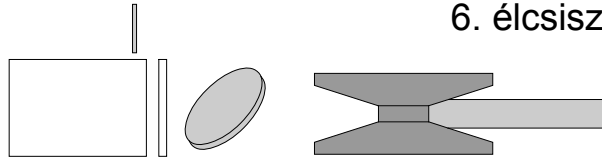


SI EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA

5. Szeletelés

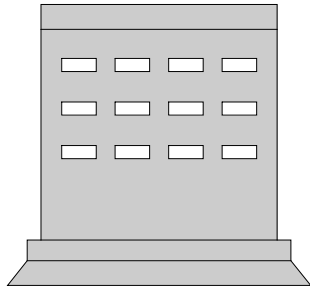


6. élcsiszolás

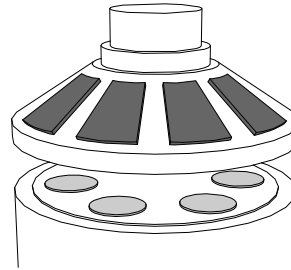


szeletek

7. hőkezelés

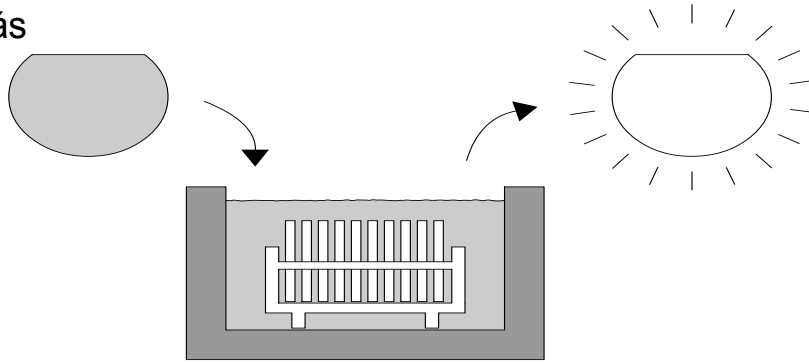


8. csiszolás (lapping)

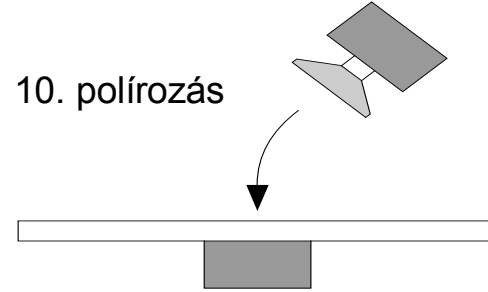


SI EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA

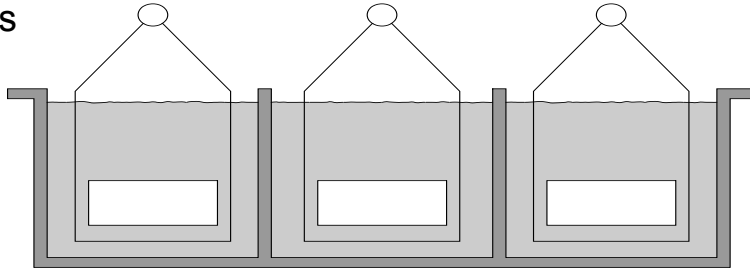
9. maratás



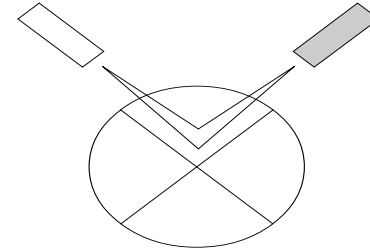
10. polírozás



11. tisztítás

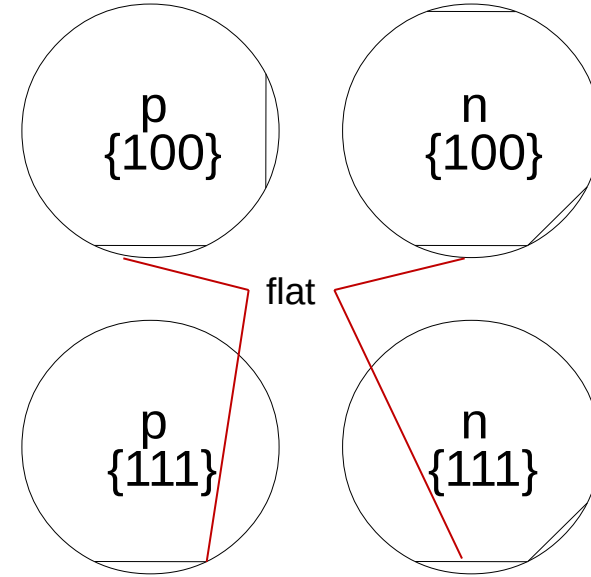


12. elektromos tulajdonságok
érintésmentes mérése



SZELETELÉS

- Előtte:
ún. **flat** beköszörülése,
amely mutatja
az **orientációt** és az **adalékolást**.



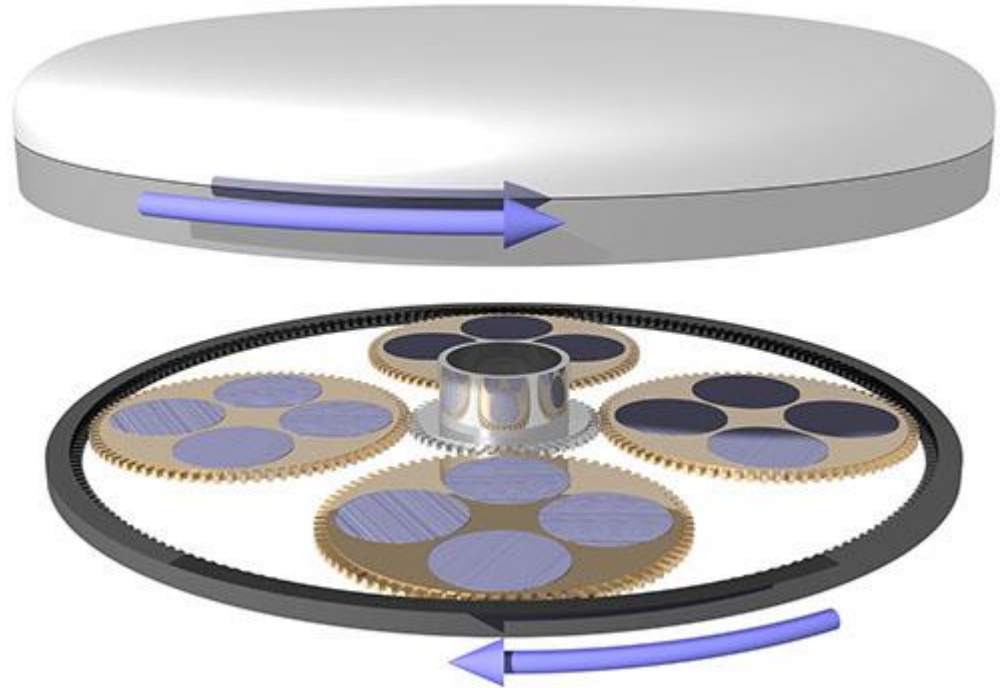
SZELETELÉS, CSISZOLÁS, POLÍROZÁS

- Belső vágóélű gyémánt körfűrészszel kb. 1 mm vastag szeleteket vágnak az öntecsből.
- A szeletelés hatására a felület szennyeződik, és repedezik.
- Ennek kiküszöbölésére több lépcsős csiszolást (mechanikai), és kémiai-mechanikai polírozást alkalmaznak.

CSISZOLÁS (LAPPING)

Feladata:

- Felületi repedések, vágási nyomok eltávolítása,
- szelet vékonyítása,
- mechanikai feszültségek felszabadítása
- Eredmény: szelet (wafer)



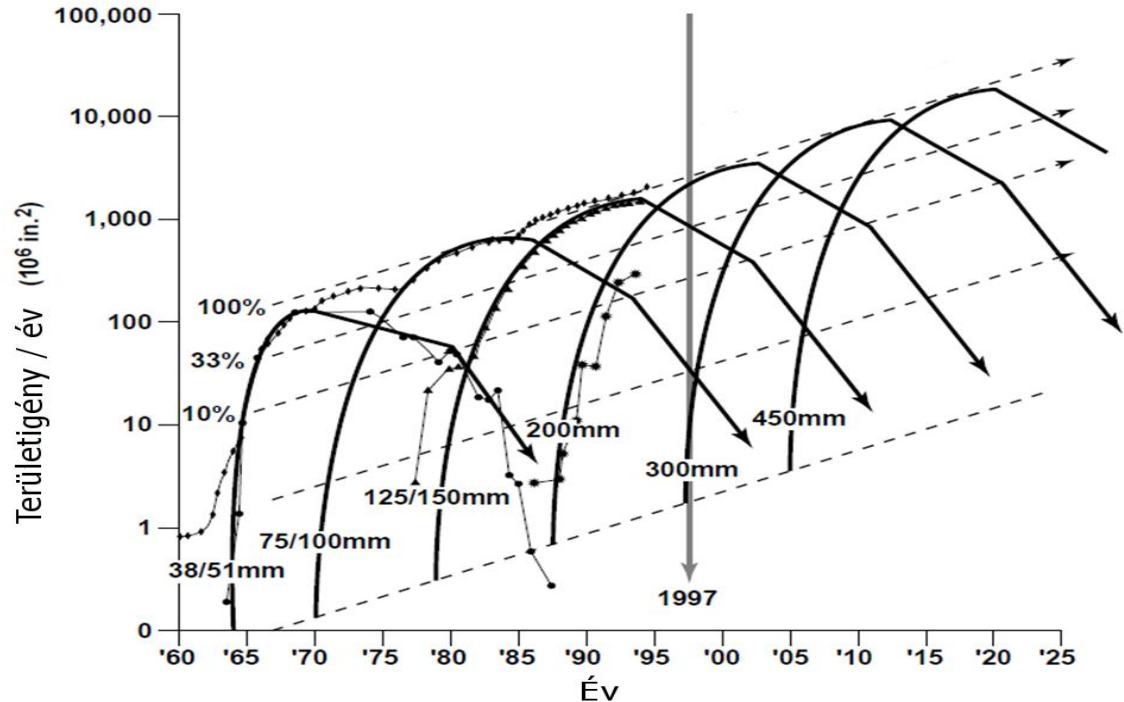
SI SZELETMÉRET ÉS ÖSSZES GYÁRTOTT SZELETFELÜLET

Jelenleg folyik a 300 mm-es átmérőről való áttérés a 450 mm-re.

Az összes felület exponenciálisan növekszik.

Kihívás:

- nagy szeletméret (nagy, nehéz öntecs)
- kihozatal növelése



ÖSSZEFOGLALÁS – FÉLVEZETŐ SZELET ELŐÁLLÍTÁSA

- A szilícium alapanyaga a természetben bőséggel áll rendelkezésre.
- A természetből nyert homokot tisztítani kell a félvezetőgyártás számára
- Rendkívüli tisztasági körülmények közt kell gyártani (a szennyezés befolyásolja a félvezető eszköz működését).
- A technológia több (mechanikai, kémiai) lépésből áll, melynek eredménye az eszközgyártásra alkalmas szelet.

Példa kérdések

1. A félvezetők elektron sáv szerkezete ...

- A ... folytonos (H)
- B ... mindig direkt (H).
- C ... mindig indirekt (H)
- D ... tartalmaz tiltott sávot (I)

2. A Miller indexeket ...

- A ... csak kristálytani síkok jelölésére használjuk (H)
- B ... csak irányok jelölésére használjuk (H)
- C ... kristály és orientációk meghatározására használjuk egy rácsban (I)
- D ... amorf anyagok szimmetriáinak leírására használjuk (H)

3. A szilícium

- A ... alacsony olvadáspontú alkáli földfém. (H)
- B ... egy vegyületfélvezető anyag (H)
- C ... egy elemi félvezető anyag (i)
- D ... nem alkalmas egykristály növesztésre (H)