

4-02: VÁKUUMTECHNIKA, VÉKONYRÉTEG TECHNOLOGIA

1. **Ismertesse a vákuum szerepét az egyes vékonyréteg leválasztási technológiák során. Mutassa be és hasonlítsa össze az elektronikai technológiákban alkalmazott három különböző fő típusú vákuumszivattyúk működését és alkalmazási területét!** A vákuum definíciója (1 pont). A rétegleválasztási folyamatok során milyen fizikai paramétereket befolyásol a vákuum minősége (1 pont). Három különböző vákuumszivattyú működése és alkalmazási területeinek ismertetése (3 pont)

DIN 28400 szabvány szerinti definíció: a vákuum a gázok egy olyan állapota, amelyben a részecskesűrűség kisebb mint a Föld légkörében

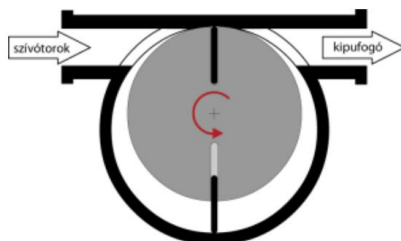
Vákuum: a légkörinél ($\sim 10^5$ Pa) alacsonyabb nyomást parciális vákuumnak, azt a nyomásértéket pedig, ahol az adott rendszerben a gázmolekulák annyira megritkultak, hogy jellemzően már nem egymással történnek ütközések, hanem szinte kizárólag a határoló falakkal, vákuumnak nevezzük.

Átlagos szabad úthossz (\sim)

A monoréteg kialakulásához szükséges idő (\sim)

ROTÁCIÓS ELŐVÁKUUM-SZIVATTYÚK FORGÓ-CSÚSZÓ LAPÁTOS SZIVATTYÚ

Működési tartomány:
 10^5 Pa \rightarrow ~ 0.1 Pa



Működési elv:
Ciklikusan magába szívja, majd elkülöníti a beszívott gáz, azután kiüriti.



A BME-ETT-n:

- vákuumpárolgató (1. fokozatként)
- elektronmikroszkóp (1. fokozatként)
- vákuummal rögzítő mintatartó asztal

NAGYVÁKUUM SZIVATTYÚK II. TURBOMOLEKULÁRIS SZIVATTYÚ

Működési tartomány:
 $\sim 10^{-2}$ Pa \rightarrow 10^{-8} Pa

Működési elv:

A gáz részecskéi impulzust kapnak a nagy sebességgel forgó lapátoktól.

Fordulatszám:

akár 100.000 fordulat / perc

Fő előnyei:

- olaj nélküli, tiszta működés,
- nagy szívósebesség,

Fő hátránya:

- viszonylag drága.



Fordulat/perc értékek összevetésképp:

- mosógép centrifuga: 1.200-ig
- NYHL CNC-fúró: 150.000-ig !!!

Pl. a BME-ETT-n:

- elektronmikroszkóp (2. fokozatként)

NAGYVÁKUUM SZIVATTYÚK I. OLAJDIFFÚZIÓS SZIVATTYÚ

Működési tartomány:
 ~ 1 Pa \rightarrow 10^{-7} Pa

Működési elv:

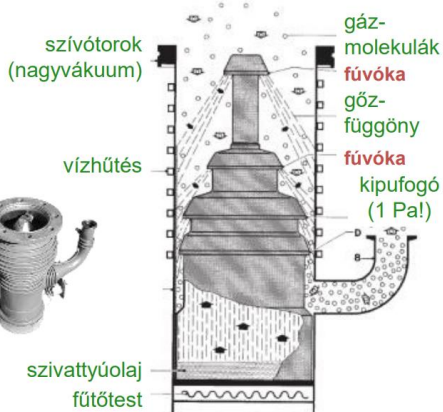
A gáz bediffundál az olajgőzbe, amely nagy sebességgel áramlik.

Fő előnyei:

- nagy szívósebesség,
- viszonylag olcsó,
- tartós és megbízható.

Fő hátránya:

- az olajgőzök a vákuumtérbe juthatnak.



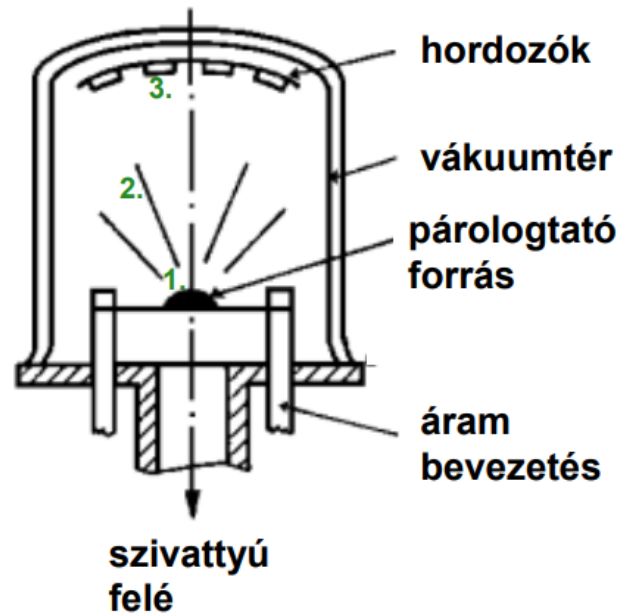
Felhasználás: BME-ETT-n: Vékonyréteg technológia

2. **Ábrával illusztrálva mutassa be a vákuumpárolgatás folyamatát!** Ábra készítése, amin a sematikus berendezés részegységeit megnevezi (2 pont). A folyamat szöveges leírása (3 pont)

A VÁKUUMPÁROLOGTATÁS FOLYAMATA

A vákuumpárolgatás során három fontos folyamat megy végbe:

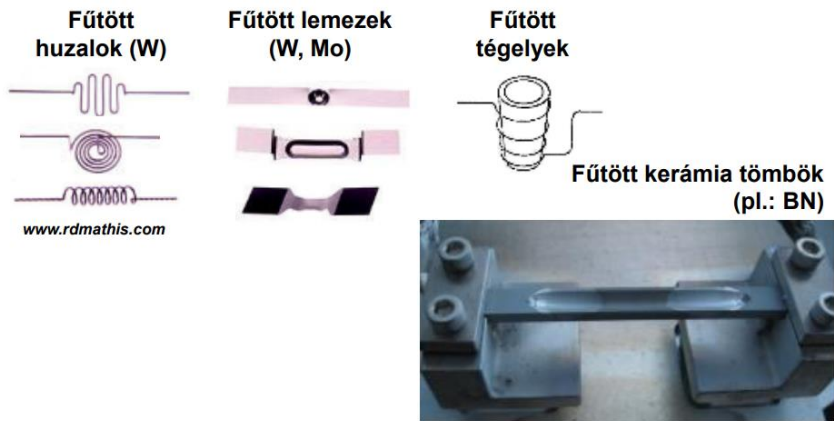
- 1. Párolgás:**
a párolgatatandó tömbanyagot atomjaira bontjuk hevítéssel
- 2. Anyagáramlás:**
a részecskék egyenes vonalban, egyenletesen áramolnak
- 3. Kondenzáció (lecsapódás):**
az atomok lecsapódnak a hordozón, először szigeteket, majd összefüggő réteget alkotva



3. **Ábra segítségével hasonlítsa a vákuumpárolgató berendezésben leggyakrabban használt párolgató forrásokat!** Ellenállásfűtésen alapuló párolgató forrás bemutatása (2 pont).
Elektronsugaras párolgató berendezés ismertetése, összehasonlítása az ellenállás hevítéssel (3 pont)

ÁRAMMAL KÖZVETLENÜL ÉS KÖZVETETTEN HEVÍTETT FORRÁSOK

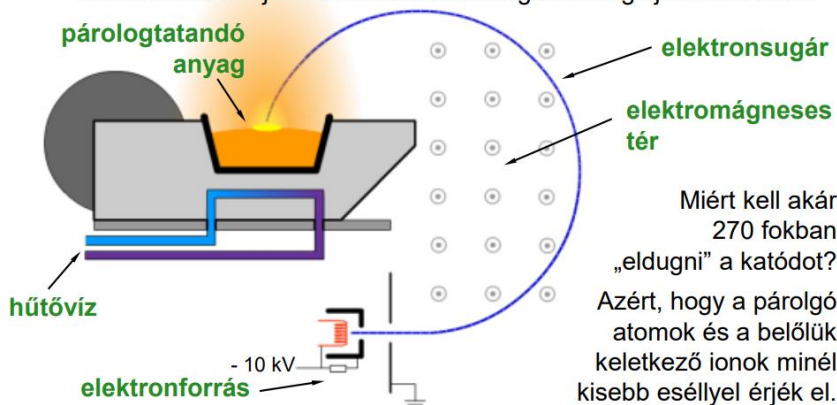
Cél: a tömbanyag részecskékre bontása -> **hevítés**



~~közvetlenül vagy közvetetten fűtött párolgató forrásokat gyűjtöttük össze.~~ A párolgatót kívánt fémet a nála jelentősen magasabb olvadáspontú huzal/spirál, lemez vagy tégl (utóbbiakat gyakran szokás „csónaknak” is nevezni) belsejébe helyezük. Ezen **ellenállásfűtésű források** esetén az elektródák közé befogott vezető forrástartón átfolyó nagy áramok által disszipált Joule-hő fogja a forrásfém hőmérsékletét olvadáspont fölé emelni. ~~A forrástartóként jellemzően használt~~

ELEKTRONSUGARAS FŰTÉSŰ PÁROLOGTATÓFORRÁS

A párolgatótandó tömbanyagot nagysebességű elektronokkal való bombázással fűtjük. Az elektronok mozgási energiája alakul hővé.



Az ellenállásfűtésű párolgató előnye az elektronsugaras párolgatóval szemben az egyszerűsége, hátránya azonban, hogy a forrástartó alapanyaga is párolg (bár kisebb mértékben) és így elszennyezi a leválasztott réteget, valamint, hogy párolgás folyamata (sebessége) kevésbé szabályozható. Ellenállásfűtésű párolgató esetén jellemzően fix anyagmennyiségeket szoktak elpárolgatózni, nagytisztaságú fémekből (pl. „5-kilences tisztaságú”, azaz 99,999 %-os fémekből).

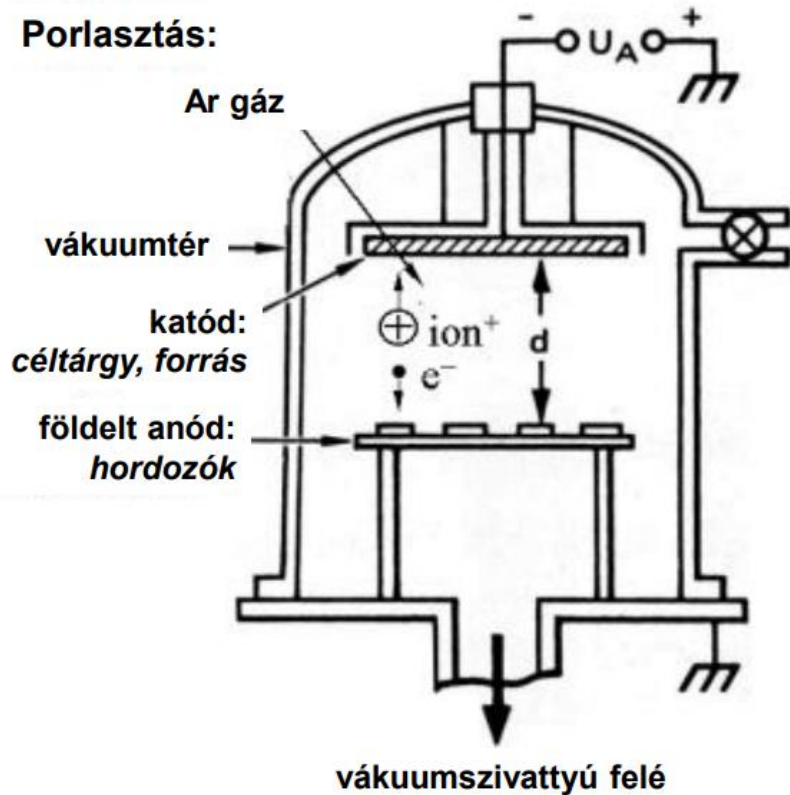
4. **Ábrával illusztrálva mutassa be a vákuumporlasztás folyamatát!** Ábra készítése, amin a sematikus berendezés részegységeit megnevezi (2 pont). A folyamat szöveges leírása (3 pont)

VÉKONYRÉTEGEK ELŐÁLLÍTÁSA VÁKUUM PORLASZTÁSSAL

- A forrásanyag atomjaira bontása:

Hevítés helyett **ionokkal való bombázással**

- Ionokat gázkisüléssel (a gáz atomjainak, molekuláinak elektronokkal való ütköztetésével) hozunk létre



A VÁKUUMPORLASZTÁS ALAPELVE

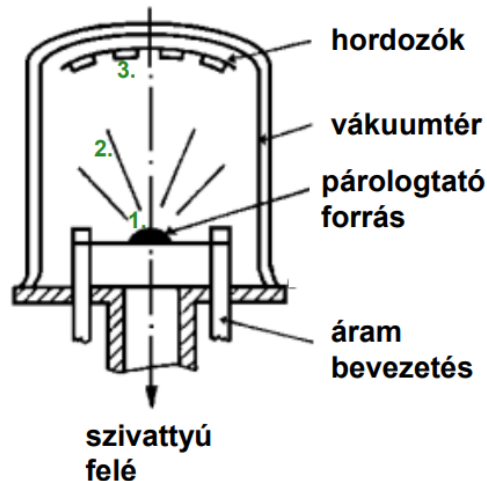
- A gáz ionok (pozitív töltésük révén) a vezető forrásanyag tömbjében irányában gyorsulnak és onnan semleges részecskéket löknek ki, amelyek lecsapódnak a hordozón (is).
- A negatív elektronok és a pozitív ionok gyorsulását a katódként bekötött forrásanyag (un. target) és hordozót tartó anódlemez közötti elektromágneses tér okozza.

5. **Ismertesse a félvezető alapú eszközök gyártása során alkalmazott fizikai rétegleválasztási technológiákat (PVD).** A vákuumpárolgatási folyamat ismertetése sematikus ábra segítségével (3 pont). A vákuumporlasztási folyamat ismertetése sematikus ábra segítségével (2 pont)

A VÁKUUMPÁROLOGTATÁS FOLYAMATA

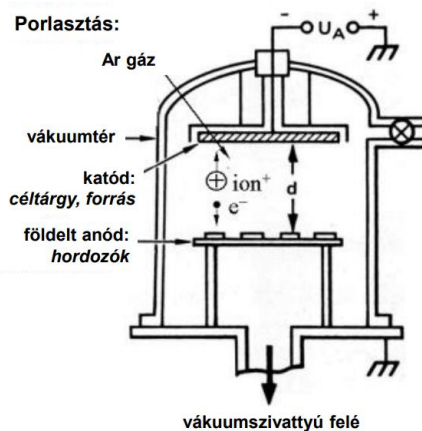
A vákuumpárolgatás során három fontos folyamat megy végbe:

- Párolgás:**
a párolgatatandó tömbanyagot atomjaira bontjuk hevítéssel
- Anyagáramlás:**
a részecskék egyenes vonalban, egyenletesen áramolnak
- Kondenzáció (lecsapódás):**
az atomok lecsapódnak a hordozón, először szigeteket, majd összefüggő réteget alkotva



VÉKONYRÉTEGEK ELŐÁLLÍTÁSA VÁKUUM PORLASZTÁSSAL

- A forrásanyag atomjaira bontása: Hevítés helyett **ionokkal való bombázással**
- Ionokat gázkisüléssel (a gáz atomjainak, molekuláinak elektronokkal való ütköztetésével) hozunk létre



A VÁKUUMPORLASZTÁS ALAPELVE

- A gáz ionok (pozitív töltésük révén) a vezető forrásanyag tömb irányában gyorsulnak és onnan semleges részecskéket löknek ki, amelyek lecsapódnak a hordozón (is).
- A negatív elektronok és a pozitív ionok gyorsulását a katódként bekötött forrásanyag (un. target) és hordozót tartó anódlemez közötti elektromágneses tér okozza.

6. **Definiálja a vékonyréteg fogalmát! Milyen speciális tulajdonságokkal rendelkezhetnek egy vékonyréteg? Soroljon fel vékonyréteg anyagokat és adja meg ezek funkcióját!** Vékonyréteg definiálása (1 pont). Olyan fizikai tulajdonságok felsorolása, amely egy vékonyréteg esetében speciális lehet (2 pont)???. Vékonyréteg anyagok példaszzerű felsorolása az alkalmazási terület megnevezésével (2 pont)

MI A VÉKONYRÉTEG?

- több, egymásnak néha ellentmondó definíció létezik,
- de mi az olyan, többnyire félvezető, üveg vagy hajlékony fólia hordozóra *leválasztott* réteget értünk alatta, amely:
 - jellemzően vákuumtechnológiával készült,
 - vastagsága pár nm-től pár um-ig terjed,
 - gyakran a tömbi anyagtól eltérő optikai és/vagy vezetési tulajdonságokat mutatnak és az a tulajdonságuk akár kihasználható.

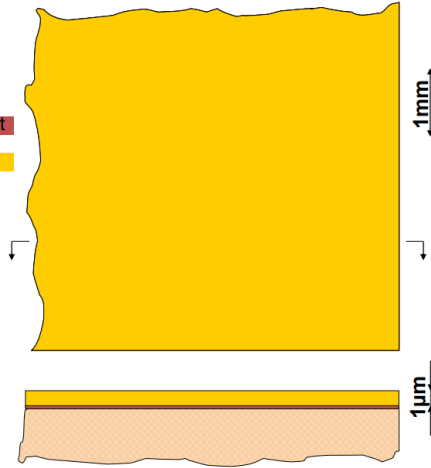
VÉKONYRÉTEG ANYAGOK

- tiszta fémrétegek, pl.:
 - arany (pl. vezetőréteg kialakítása)
 - alumínium (pl. képcsőben, IC gyártásban vezetőréteg, tükröként)
 - réz (pl. vezetékezés vékonyréteg áramkörökben)
- ötvözetek, vegyületek, pl.:
 - NiCr (nikkel-króm réteg, vékonyréteg ellenállás anyaga)
 - TiN (titán-nitrid, extra keménységű bevonatként kopó alkatrészekben)
 - ITO (indium ón oxid, átlátszó és vezető vékonyréteg pl. LCD-ben)
 - TaN (tantál-nitrid, ellenállás anyag)
- félvezető rétegek, pl.:
 - amorf Si (vékonyréteg tranzisztorként LCD-ben, napelemben)
 - polikristályos Si
- dielektrikumok, pl.:
 - MgF_2 (optikai anti-reflexiós réteggént)

7. **Ábra segítségével illusztrálva mutassa be vékonyréteg ellenállás kialakításának technológiai lépéseit!** Az ellenállás vékonyréteg kialakításának szekvenciája rajzzal illusztrálva (3 pont). A Lézeres ellenállásérték beállító folyamat ismertetése (2 pont)

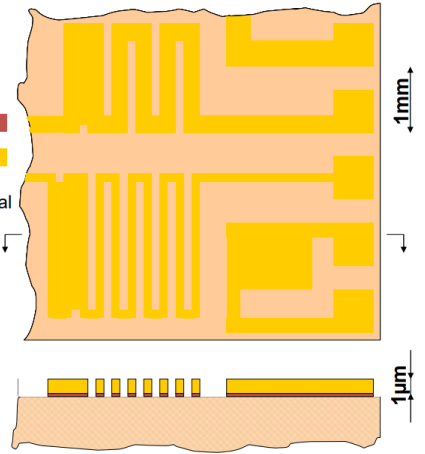
PÉLDA VÉKONYRÉTEG ELLENÁLLÁS HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSÁRA

1. Az üveg hordozóra...
 - ...leválasztjuk az ellenállás réteget
 - ... leválasztjuk a vezetőrétetet



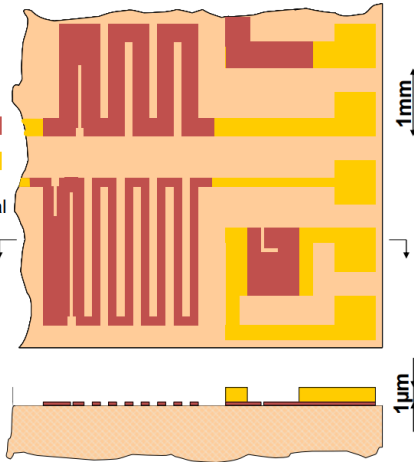
PÉLDA VÉKONYRÉTEG ELLENÁLLÁS HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSÁRA

1. Az üveg hordozóra...
 - ...leválasztjuk az ellenállás réteget
 - ... leválasztjuk a vezetőrétetet
2. Mintázatkialakítás fotolitográfiával
 - ... maratjuk a vezetőrétetet
 - ... maratjuk az ellenállás réteget



PÉLDA VÉKONYRÉTEG ELLENÁLLÁS HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSÁRA

1. Az üveg hordozóra...
 - ...leválasztjuk az ellenállás réteget
 - ... leválasztjuk a vezetőrétetet
2. Mintázatkialakítás fotolitográfiával
 - ... maratjuk a vezetőrétetet
 - ... maratjuk az ellenállás réteget
- ... második fotolitográfiával...
 - ... maratjuk a vezetőrétetet
3. Lézerrel értékbeállítunk



Értékbeállításakor lézerrel **szigetelő vágatot** munkálunk a rétegbe. Ezzel a módszerrel az ellenállás értéke **csak növelhető**

8. **Mutassa be a vékonyréteg áramköröknél használatos mintázatkialakítási módszereket!** A rétegfelvitel közben történő mintázatkialakítás bemutatása (2 pont). A rétegfelvitel utáni mintázatkialakítás bemutatása (3 pont)

MINTÁZATKIALAKÍTÁSI MÓDSZEREK

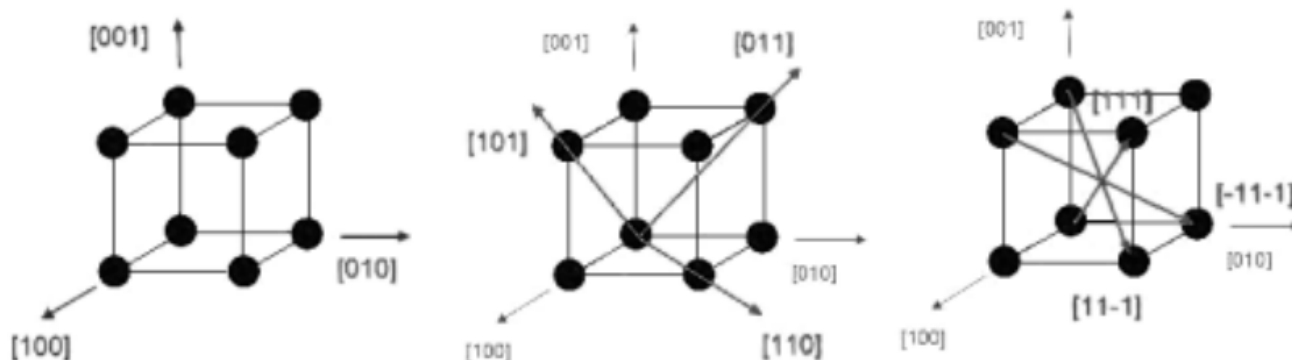
- mintázatkialakítás a rétegfelvitel közben
 - **fémmaszkon** (a kívánt mintának megfelelő nyílásokon) keresztüli párologtatás
 - **fő előny:** a maszkot nem kell közvetlenül a hordozóhoz érinteni, pár mm-es távolságra is lehet tőle
 - **fő hátrány:** az elérhető vonalszélesség nagyobb mint 500 μm
- mintázatkialakítás a rétegfelvitel utáni lépésben
 - **fotolitográfia** (mint a Si és NYHL technológiában – L. 2.5/5.1 tétel)
 - **fő előny:** finomabb alakzatok
 - **fő hátrány:** tisztaságra és technológiai paraméterekre érzékeny, összetett folyamat
 - közvetlen **lézeres rétegeltávolítás**
 - **fő előny:** rugalmas technológia, a mintázat bármikor módosítható
 - **fő hátrány:** alacsonyabb termelékenység

5-01: FÉLVEZETŐ ANYAGOK JELLEMZŐI + FÉLVEZETŐ SZELET ELŐÁLLÍTÁSA

1. **Kristálytani irányok köbös kristályban, anizotrópia-izotrópia. Irányok** bemutatása Miller indexekkel 3 ábrán (3 pont), egykristály anizotrópiája (1pont), polikristály izotrópiája (1pont)

FIZIKAI PARAMÉTEREK – MILLER-INDEX IZOTRÓP ÉS ANIZOTRÓP TULAJDONSÁGOK

- Irányok egyszerű köbös rácsban:

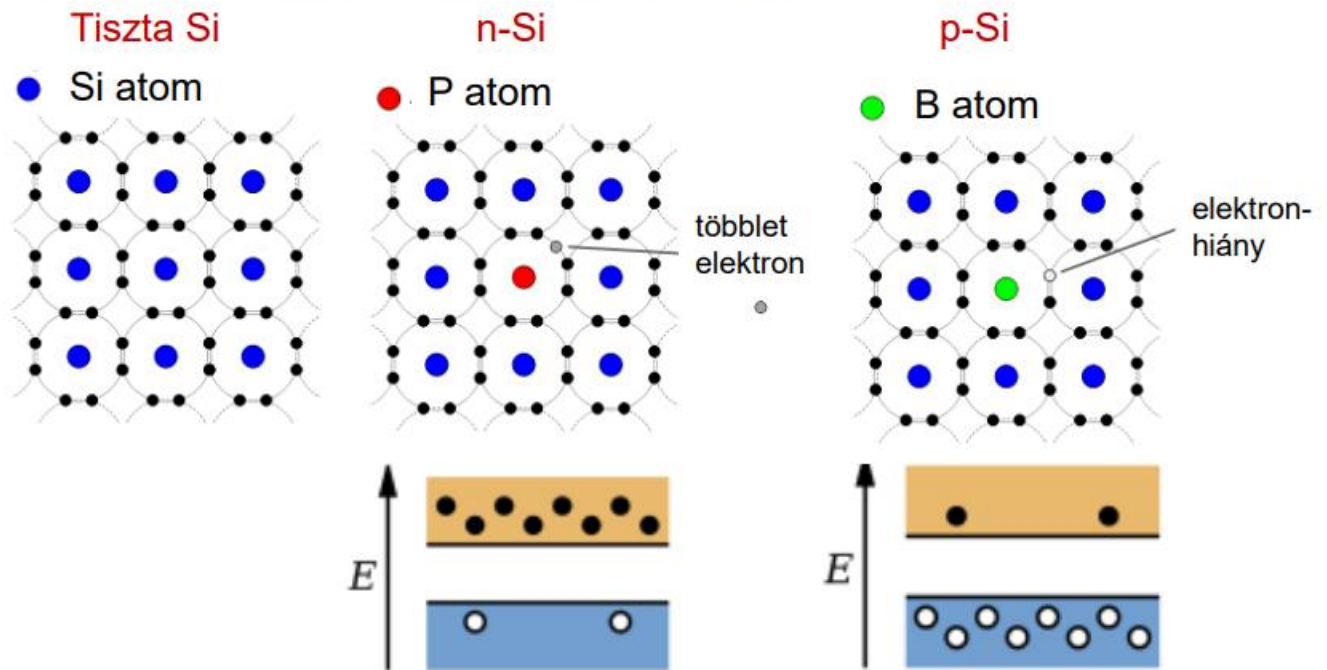


Az **egykristály** fizikai (termikus, mechanikai, elektromos, marási) tulajdonságai anizotrópák, azaz irányfüggőek.

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

2. **Ismertesse a p és n típusú adalékolást félvezető anyagok esetében!** A p és n típusú adalékolás lényegének ismertetése kristályrács szintű rajzon (3 pont) és energia diagramon (2 pont)

FIZIKAI PARAMÉTEREK – ADALÉKOLTSÁG HATÁSAI



n-típusú adalékolás:
a többségi töltéshordozók az
elektronok.

p-típusú adalékolás:
a többségi töltéshordozók a
lyukak.

3. **Technológiai szempontból milyen lényeges tulajdonsággal rendelkezik a szilícium-dioxid.** A Si szelet előállításában a SiO₂ szerepének ismertetése a technológiai folyamatokon keresztül (2 pont). A fontosabb fizikai tulajdonságok felsorolása, és ezek jelentőségének bemutatása a technológia szempontjából (3 pont)

Az SiO₂ a Szilícium egykristály alapanyaga, ebből állítják elő a polikristályos Si-t, ami szükséges a Si szelet előállításához. Ebben a folyamatban magas hőmérséklet és sósavval való reagáltatás is jelen van, ezeknél fontos az SiO₂ alacsony hővezetőképessége, és az a tulajdonsága, hogy csak a hidrogén-fluorid oldja.

SZILÍCIUM-OXID TULAJDONSÁGAI

Szilícium-(di)oxid (SiO₂, angol: silica), kristályos formája a kvarc. Tulajdonságok:

- elektromosan szigetelő **Hordozóra oxid rétegnek tökéletes gate dielektrikum**
- alacsony hővezetőképesség **Volt**
- olvadáspont: 1830 °C (> Si) **Kibírja a technológia magas hőmérsékleteit**
- kémiai és mechanikai stabilitása kiváló **Emiatt a maratás maszkanyaga**
 - savak közül csak a hidrogén-fluorid oldja (csak ezzel mintázható!), emiatt maratás maszkanyaga
 - diffúzió és implantáció esetében is maszk



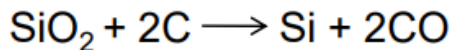
4. **Mutassa be a polikristályos szilícium előállításának lépéseit.** A polikristályos Si definíciója és a poli-Si jelentőségének ismertetése az egykristály növesztés szempontjából (2 pont). A poli-Si készítésének 3 alapvető lépésének felsorolása és részletezése (3 pont)

Polikristályos: (mikrokristályos), ha az anyag több (egy)kristály szemcséből épül fel.
Polikristályos Si: több Si egykristály szemcséből épül fel.

A polikristályos Si jelentősége az egykristály növesztésben az, hogy megolvasztható 1600 fokra hevítve, és formázható olvadékként, így lesz belőle öntecs.

POLIKRISTÁLYOS SI KÉSZÍTÉSE

1. Homokból ívkemencében magas hőmérsékleten nyers Si



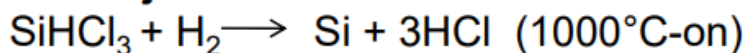
Ez a Si még szennyezett.

2. Nyers Si reagáltatása sósavval



A triklór-szilán gáz, könnyen desztillálható.

3. CVD eljárással Si leválasztása triklór-szilánból



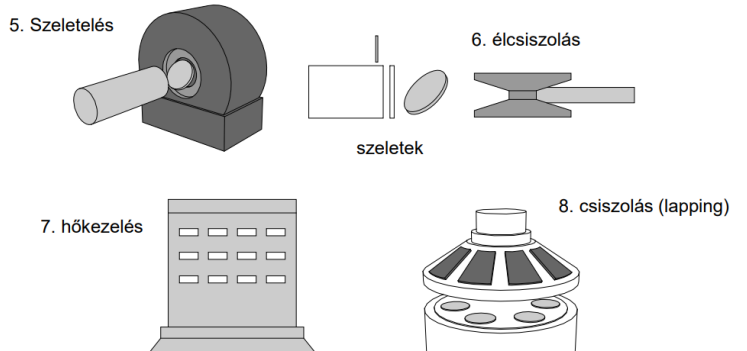
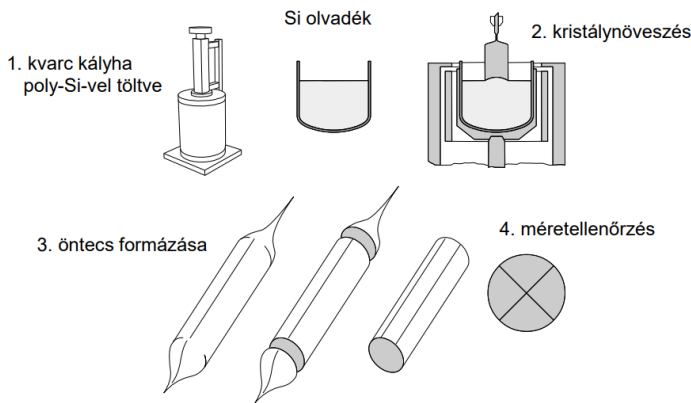
Az utolsó lépésben keletkezett Si gőzfázisból válik ki egy pálcára (szintén Si).

A tiszta olvadékot ebből a pálcából készítik.

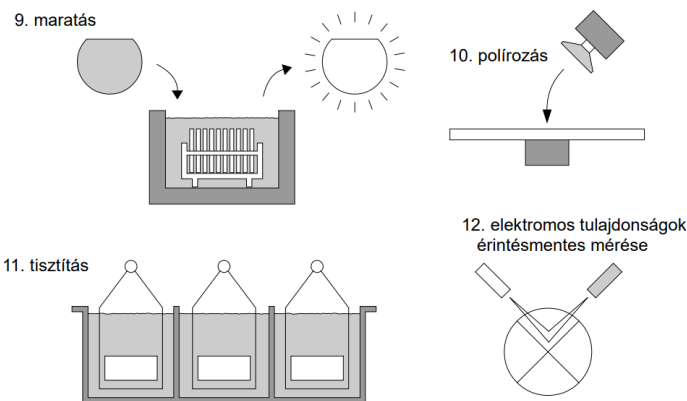
5. **Ismertesse a félvezető egykristály feldolgozásának főbb lépéseit.** Az öntecs formázása és a szeletek előállításának lépési (2 pont). A szeleteket mechanikai megmunkálására használt technológiák ismertetése (1 pont). A félvezető egykristályok szerkezetének bemutatása, példa a különböző rácsokra (1 pont)???. A flat szerepének és kialakításának ismertetése (1 pont)

SI EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA

SI EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA



SI EGYKRISTÁLY FELDOLGOZÁSA



SZELETELÉS, CSISZOLÁS, POLÍROZÁS

- Belső vágóélű gyémánt körfűrészsel 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.

FÉLVEZETŐK KRISTÁLYSZERKEZETE

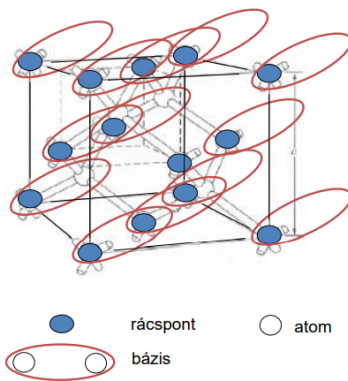
Gyémánt, szilícium: két lapcentrált köbös rács elcsúsztatva a térátló negyedével.

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

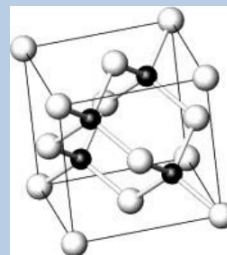
A rács lapcentrált köbös.

A kristály az atomi bázis eltolása minden lehetséges rácsvektorral.

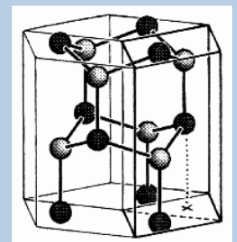
Elemi cella: egy kristály azon legkisebb geometriai egysége, amelynek három irányban való, önmagával párhuzamos eltolásával felépíthet a kristály.



FÉLVEZETŐK KRISTÁLYSZERKEZETE



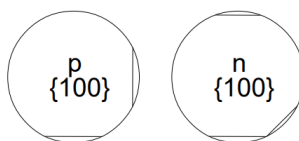
Lapcentrált köbös, két különböző atomból álló bázissal (pl. **GaAs**): a pozíciók azonosak a gyémántrácscsal, de itt váltakoznak az atomok 1:1 arányban.



Hatszöges rács (pl.: **GaN**): a kétféle atom külön-külön hatszöges rácsot alkot.

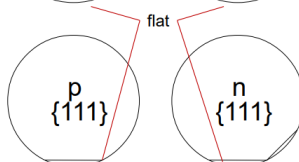
SZELETELÉS

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



és

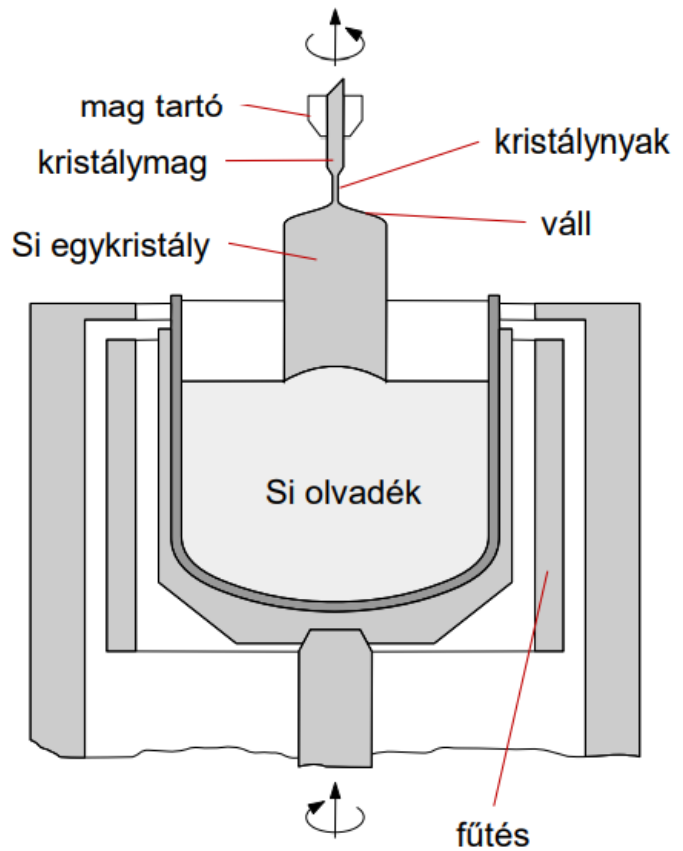
- az **adalékolást**.



6. **Magyarázó ábra segítségével ismertesse a Si kristálynövesztésre alkalmazott Czochralski eljárást!** Ábra készítése, amin a sematikus berendezés részegységeit megnevezi (2 pont). A folyamat szöveges leírása (2 pont). A legfontosabb folyamatparaméterek kihangsúlyozása (1 pont)

A CZOCHRALSKI ELJÁRÁS

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

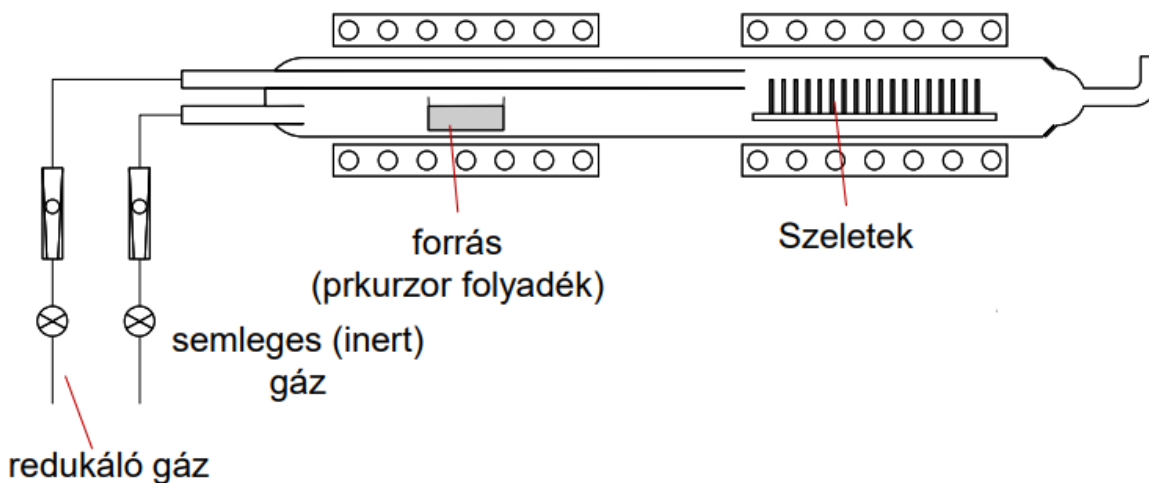


5-02: RÉTEGLEVÁLASZTÁSI, ÉS ADALÉKOLÁSI TECHNOLOGIÁK

1. **Ismertesse a félvezető alapú eszközök gyártása során alkalmazott kémiai gőzfázisú rétegleválasztási technológiát (CVD).** A CVD folyamat definíciója (1 pont). Egy sematikus CVD reaktor felrajzolása az ábra egyes részeinek megjelölésével (2 pont). Félvezető technológiában CVD-vel leválasztott anyagok felsorolása az egyes rétegek funkciójának ismertetésével (2 pont)

A CVD eljárás során a gáz-halmazállapotú prekursor (vagy prekursorok) hőmérsékleti és/vagy egyéb (plazmakisülés, lézer, fény stb.) gerjesztési módszerekkel kémiai átalakuláson megy át, amelynek eredményeképpen a hordozó felületén szilárd halmazállapotú vékonyréteg keletkezik.

A CVD REAKTOR SZERKEZETE



CVD-VEL LEVÁLASZTHATÓ ANYAGOK A FÉLVEZETŐ TECHNOLOGIÁBAN (példák)

- Egykristály hordozót folytató Si réteg, epitaxia (szilán prekursor bontása)
$$\text{SiH}_4 \text{ (szilán, g)} \rightarrow \text{Si (s)} + 2 \text{H}_2 \text{ (g)} \quad (1000 \text{ }^\circ\text{C})$$
- Egykristályos v. polikristályos Si – epitaxia, kapuelektroda (Si-tetraklorid)
$$\text{SiCl}_4 \text{ (g)} + 2 \text{H}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{Si (s)} + 4 \text{HCl (g)} \quad (800\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C})$$

(Megfordítható folyamat, marás is lehetséges. A reakció sebesség függvénye a kristályszerkezet - egykr. v. polikr.)
- SiO₂ (szilícium-oxid) – dielektrikum (tetraetil-ortoszilikát, 600 °C-on)
$$\text{Si(OC}_2\text{H}_5)_4 \text{ (g)} \rightarrow \text{SiO}_2 \text{ (s)} + 2 \text{O(C}_2\text{H}_5)_2 \text{ (g)}$$
- Si₃N₄ – szigetelő réteg PECVD-vel (szilán és ammónia keverékből)
$$3 \text{SiH}_4 \text{ (g)} + 4 \text{NH}_3 \text{ (g)} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 \text{ (s)} + 12 \text{H}_2 \text{ (g)}$$

2. **Ismertesse a szilícium szeletre történő oxidréteg növesztési eljárások alapjait. Rajzolja le a száraz és nedves oxidációs eljárások során használt berendezések sematikus ábráját.** Az oxidnövesztés jelentőségének ismertetése (1 pont). A száraz (2 pont), ill. nedves (2 pont) oxidnövesztési technológia folyamatainak rövid ismertetése

OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

A SiO₂ növesztésének célja lehet:

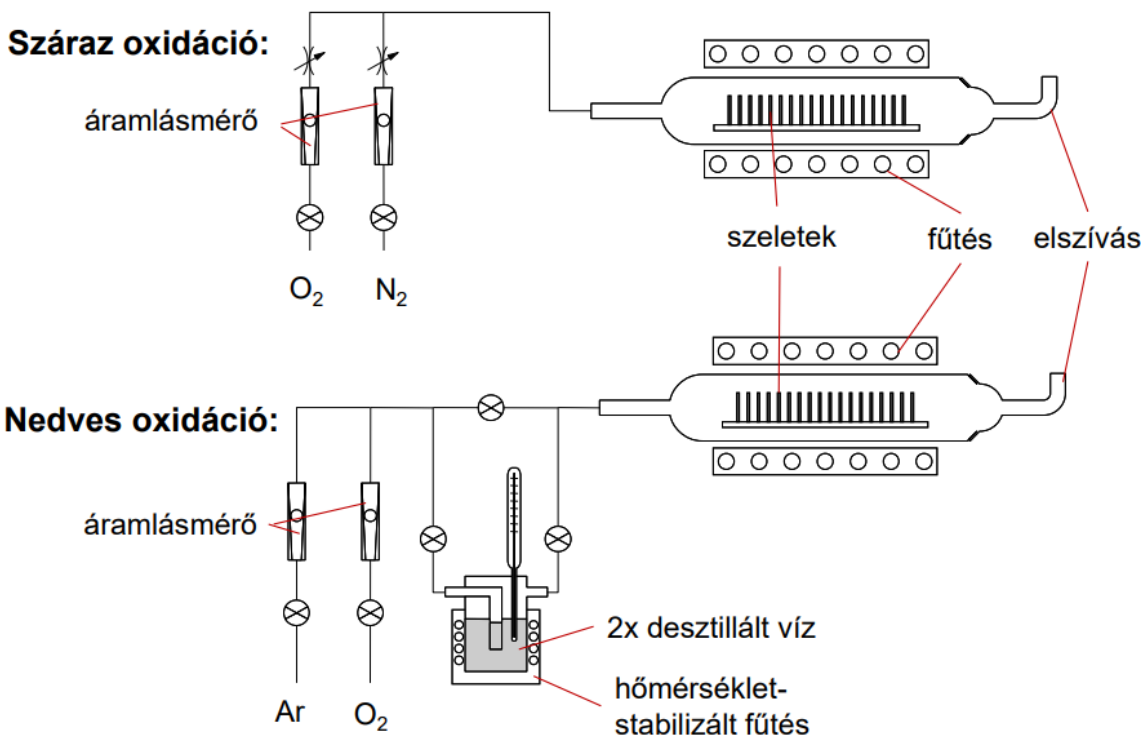
- dielektrikum réteg létrehozása (pl. kapuelektroda),
- maszkréteg kialakítása diffúzió vagy ionimplantáció előtt.

Növesztése történhet:

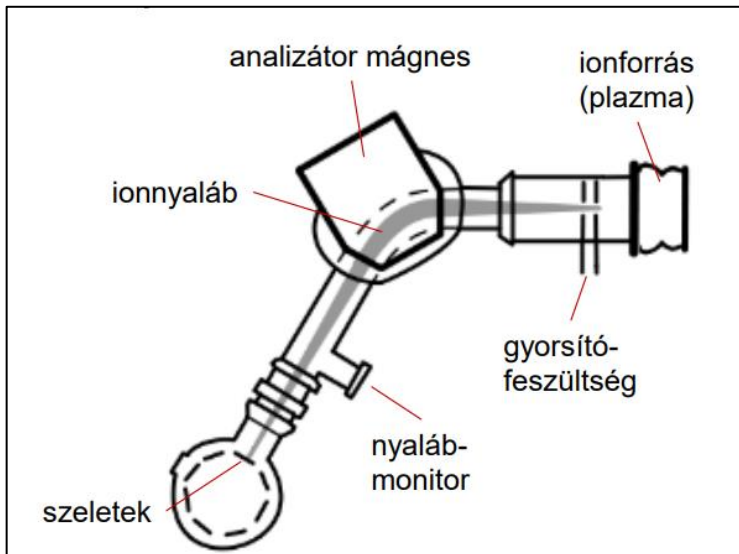
- CVD-vel,
- száraz oxidációval: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
Pl.: 1000 °C-on 7 nm SiO₂ 15 perc alatt nő (kapuelektroda).
- nedves oxidációval: $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$
Pl.: 10x gyorsabb a száraz oxidációnál. 1000 °C-on 700nm SiO₂ nő meg 1,5 óra alatt.

A hőmérséklet tipikusan 900-1200 °C között van. Ekkora hőmérsékleten a H₂O és az O₂ is könnyen diffundál át a szilícium-oxidon, így nem áll le a növekedés.

OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA



3. **Ismertesse a félvezető alapanyagok ionimplantációval történő adalékolásának alapjait.** Egy ionimplantációs berendezés sematikus rajza az egyes részek megnevezésével (2 pont). Az ionimplantációval kialakított adalékkoncentráció mélység-profiljának összehasonlítása a diffúzióval kialakítottéhoz képest (2 pont). A csatornahatás ismertetése (1 pont)



A DIFFÚZIÓ ÉS AZ IMPLANTÁCIÓ KONCENTRÁCIÓ-PROFILJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

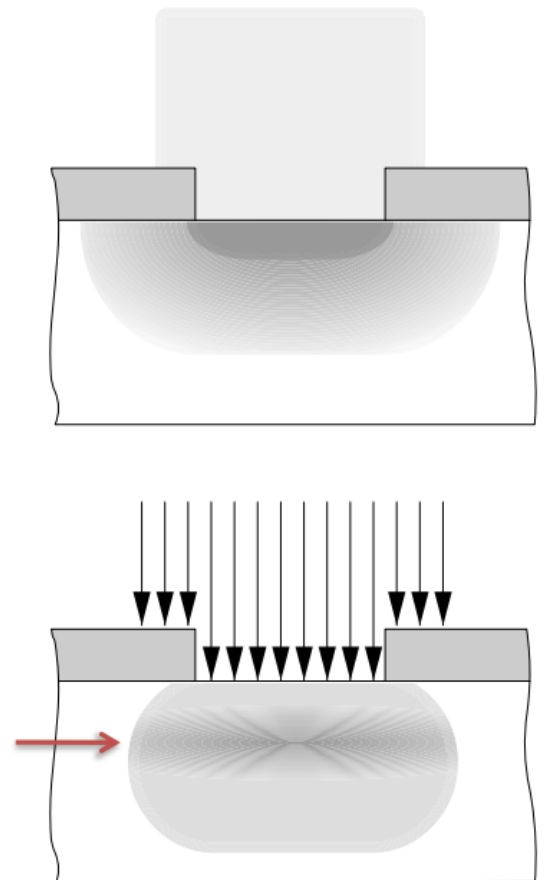
Diffúzió esetében:

A legnagyobb koncentráció a felületen alakul ki.

Az implantáció esetében:

Meghatározható mélységben van a legnagyobb koncentráció.

Csatornahatás: megfelelő orientációjú kristályban csatorna alakul ki, amely „vezeti” az adalékokat. Ez általában nem kívánatos, ezért szándékosan félreorientálják néhány fokot.



1. **Mutassa be a félvezető eszközök rajzolatkialakítására szolgáló litográfia általános szekvenciáját és röviden ismertesse az egyes lépések lényegét!** A litográfia alapjainak ismertetése, definíció (1 pont). A litográfia egyes lépéseinek felsorolása (2 pont). A litográfiai lépések magyarázata az adott folyamat lényegének ismertetés (2 pont)

LITOGRÁFIA CÉLJA

(Alapjai)

- Litográfia jelentése: kőrajz
- Síkbeli alakzatok létrehozása a félvezető szelet felületén
 - Többszöri alkalmazásával több rétegben építkezhetünk

A bonyolult elektronikus félvezető eszközökben a litográfias lépések száma megközelíti a 100-at!

LITOGRÁFIA ÁLTALÁNOS FOLYAMATA

0. Mintázandó anyag felvitele

A mintázandó anyag lehet funkcionális (pl. fém, szigetelő, félvezető), vagy maszk (pl. SiO_2)

Lehetséges, hogy a szubsztrát anyagát mintázzuk. (pl. MEMS eszközök, tömbi mikromechanika).

1. Reziszt (maratásálló réteg) felvitele **1. Védi a mintázandó anyagot**
2. Reziszt „megvilágítása” (pl. fénnel, elektronsugárral...) „árnyékoló” maszkon keresztül **2. Elkészíti a rajzolatot reziszttel**
3. Előhívás (reziszt leoldása a mintázatnak megfelelően)
4. Mintázandó anyag marása **3. Mintázandó anyag felfedése olyan helyeken, ahol nincs rá szükség**
Lehet nedves vagy száraz maratással.
5. Maradék reziszt leoldása **4. Mintázandó anyag eltávolítása olyan helyeken, ahol nincs rá szükség**
5. A rezisztre már nincs szükség

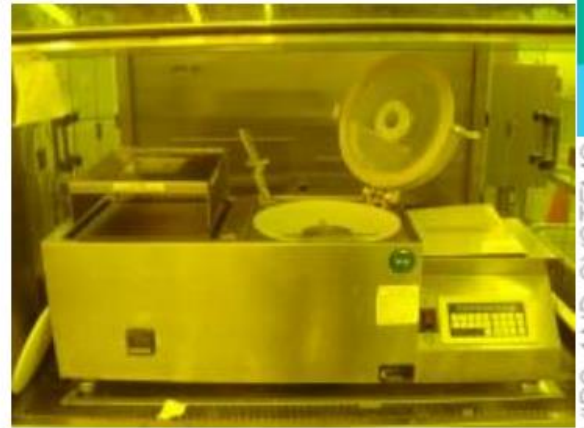
2. **Ismertesse a fényérzékeny reziszt felvitelére alkalmazott spin-coating technológiát. Mutassa meg mi a különbség a pozitív és a negatív maszkok között.** A spin-coating folyamat ismertetése a folyamat lényeges paramétereinek felsorolása (2 pont). A pozitív és a negatív maszk értelmezése (1 pont) illetve működésük leírása egy-egy ábra segítségével (1+1 pont)

1. FOTOREZISZT FELVITELE

- Centrifugálás: ún. **spin-coating**

A folyadék halmazállapotú rezisztet felcseppentjük a tisztított szeletre, és azt a középpontján áthaladó tengely körül forgatjuk. (Fordulatszám: 1200-4800 1/min)

Az eredmény: egyenletes, 0,5-2,5 μm vastagságú bevonat. Finomabb rajzolathoz vékonyabb reziszt szükséges.



reziszt „spinner”

1. A REZISZTEK TÍPUSAI

Pozitív működésű reziszt:

Oldhatóvá válik, ahol az exponáló sugárzás érte.

Pozitív reziszt:

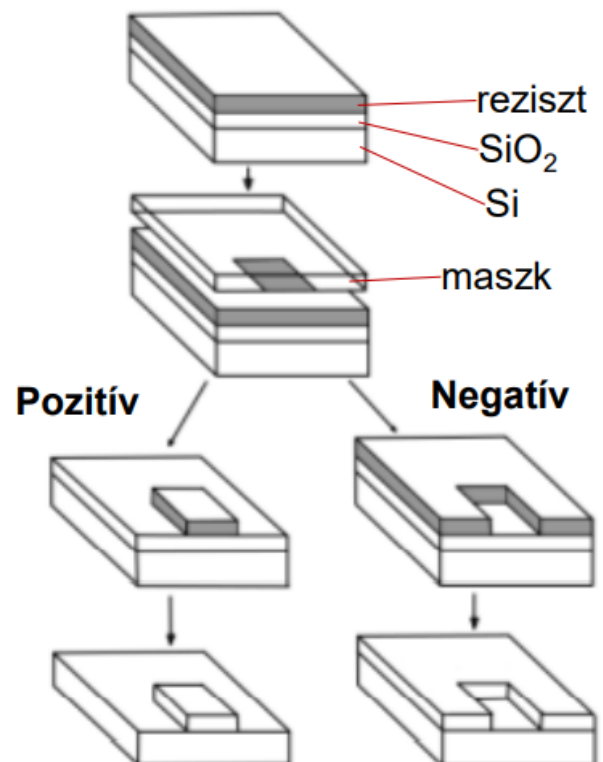
Azért pozitív, mert a maszk és a réteg mintázata megegyezik.

Negatív működésű reziszt:

Oldhatatlanná válik, ahol az exponáló sugárzás érte.

Negatív reziszt:

A maszk és a réteg mintázata egymás komplementere.



Pozitív és negatív reziszt SiO_2 oxidmaszk készítése esetében

3. **Mutassa be a fotolitográfiai vetítés típusokat ábrákkal és a hagyományos maszkos megvilágítás problémáját.** A vetítés típusok (egyenként 1-1, összesen, 3pont) maszkolás ábra (2 pont).

2. EXPONÁLÁS – VETÍTÉS TÍPUSAI: AZ 1:1 ARÁNYÚ LITOGRAFIA

1. Kontakt litográfia

2. Közelségi litográfia

- Rés alkalmazásának előnye: nem sérül a maszk
- Hátránya: a fény szóródással behatol nem kívánt területekre is

2. EXPONÁLÁS – VETÍTÉS TÍPUSAI: MINTÁZAT VETÍTÉSE LÉPTETÉSSSEL („STEP-AND-REPEAT”)

- Maszk: elektronsugárral mintázott króm bevonat kvarcüvegen

2. RAJZOLAT KIALAKÍTÁSA – HAGYOMÁNYOS MASZKOK

Fényhullám térerősség

Energia (intenzitás) eloszlás

Reziszt exponálási határa

Reziszt előhívás után (fala nem függőleges, limitált a felbontás, max 50nm)

LITHOGRAPHY AND SYSTEMS

4. **Mutassa be a rajzolat kialakítás során használt litográfiai eljárásokat előnyökkel és hátrányokkal!** Az eljárások megnevezése (2 pont), az eljárások összevetése (3 pont)

2. LITOGRÁFIÁK

- Fénnyel:
 - előny: hagyományos lencsékkel, tükrökkel fókuszálható
 - hátrány: diffrakció a 100 nm alatti mérettartományban
Spec. megoldás 2020-ban EUV (13,5 nm)
- Elektronsugárral:
 - előny: nagyon jó felbontás érhető el (<10nm), maszk nélküli eljárás
 - hátrány: elektromágneses optika szükséges, vákuumot igényel, tömeggyártásra nehezen alkalmazható
- Röntgensugárral:
 - előny: nagyon jó felbontás érhető el nagy mélységben is (<10nm)
 - hátrány: kollimátoros (maszkolt) v. refraktív nyalábformálás
- Ionsugárral:
 - előny: nagyon jó felbontás érhető el (<10nm), közvetlen rétegmegmunkálás lehetséges
 - hátrány: elektromágneses optika szükséges, vákuumot igényel, egyedi gyártásra alkalmas, roncsolást okozhat a felületen.

5. **Írja le az EUV és röntgenlitográfia lényegét, jellemzőit, mutassa be ábrán a nagy oldalarányú litográfia megvalósítását.** Az eljárások bemutatása (2-2 pont), ábra (1 pont)

Az EUV (extrém UV) tartományban: 13,5 nm-es hullámhossz

Kihívások:

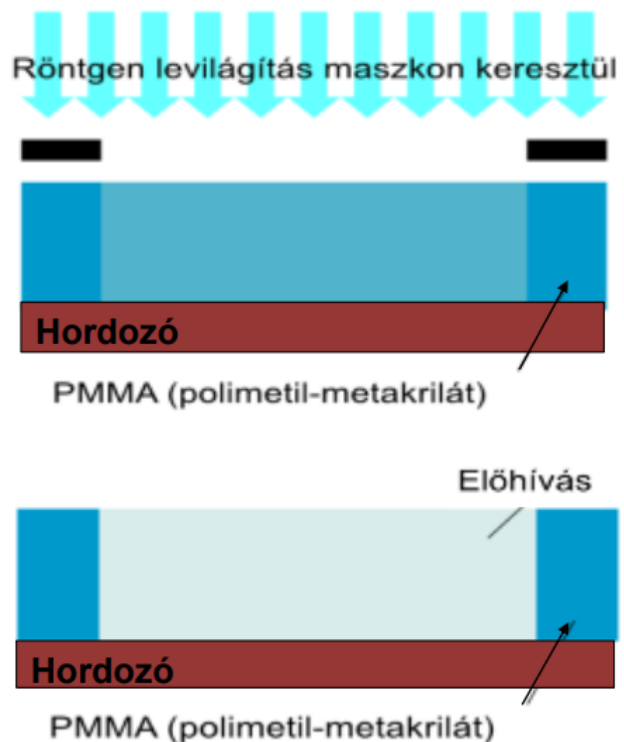
- Ezen a hullámhosszon az optikai anyagok elnyelnek, lencsékkel nem készíthető optika
- Nagy energiájú fotonok roncsolhatják az alapanyagot
- Vékonyabb rezisztet kell alkalmazni
- Az 5nm-es technológia még EUV-val működik (pl. Samsung)

What is EUV Lithography

- Uses light with a very small wavelength (13.5 nm, or 1.3×10^{-6} cm) - from the Extreme Ultra Violet region of the light spectrum - to transfer images from a mask onto a silicon wafer

2. RÖNTGENSUGARAS LITOGRAFIA

- Rtg. foton hullámhossza: $\lambda < 1$ nm,
- Klasszikus megoldás: kollimált levilágítás maszkon keresztül
- Reziszt: PMMA
- Szinkrotron (nagyenergiájú párhuzamos) sugárzással nagy pontossággal nagy mélységű megvilágítás
- Nagy oldalarány (vastagság/szélesség) valósítható meg
- Laterális felbontás javítása diffraktív optikával (Fresnel zónás) lehetséges (*Részletesebben I. Nanotudomány*)



6. **Ismertesse a Si félvezető technológiában használt maratási eljárásokat! Röviden ismertesse ezek főbb tulajdonságait!** Az izotróp és anizotróp maratási technológiák ismertetése rajzon (2 pont). A száraz maratási eljárások (2 pont) bemutatása, ábra (1 pont).

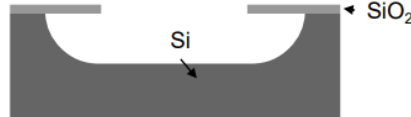
3-4. ELŐHÍVÁS UTÁN A MINTÁZANDÓ ANYAG MARÁSA: A MARATÁS TÍPUSAI

A marás lehet iránykarakterisztika alapján:

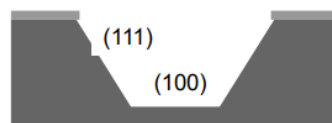
- izotróp: a hordozó minden irányában (közel) azonos a marási sebesség
- anizotróp: egy kitüntetett irányban nagyságrendekkel lassabb a marás, mint más irányokban. Az anizotrópia mértéke Si-ban (111):(110):(100) ~ 1:600:400

Szilícium (Si) maratószerrei:

Izotróp maratáshoz:
 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$
 (fluorsav + salétromsav + ecetsav)



Anizotróp maratáshoz: KOH



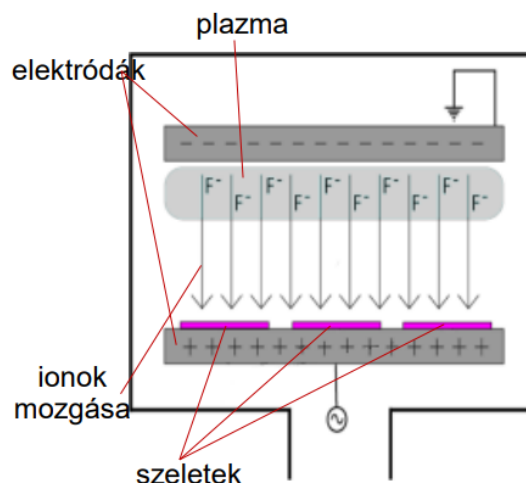
4. A MINTÁZANDÓ ANYAG MARÁSA: SZÁRAZ MARÁS TÍPUSOK

Plazma maratás (PE = Plasma Etching): RF gerjesztéssel alacsony nyomáson (0,1-5 Torr, néhány 100 Pa) **plazmát** állítanak elő - a plazmában keletkező szabad gyökökkel bíró semleges gázrészecskékkel (F, CF_3 , O) kémiai reakció megy végbe a hordozón illékony terméket eredményezve. A marási profil izotróp v. (mélységi) anizotróp.

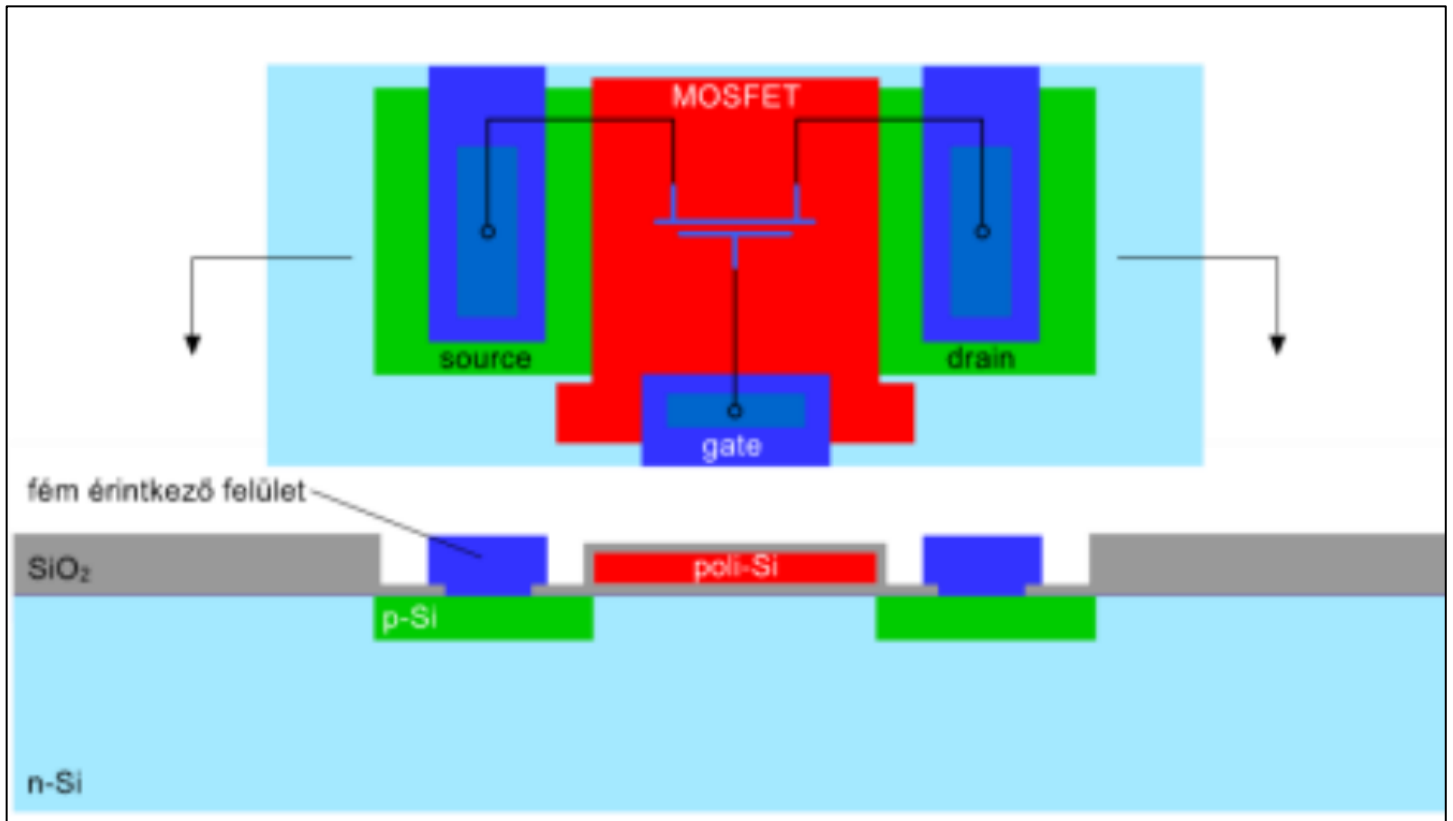
Ionmaratás (IE = Ion Etching, Sputter Etching): 10^{-4} Torr (mPa) fizikai maratás (porlasztás) nemesgáz ionokkal (pl. Ar^+), anizotróp.

Ionsugaras maratás (IBE = Ion Beam Etching): fizikai maratás ionágyúval, igen anizotróp. (FIBE=Focused Ion Beam Etching)

Reaktív ionmaratás (RIE = Reactive Ion Etching): a plazmamaratás ionokkal segített változata 10^{-3} - 10^{-1} Torr nyomáson, ahol vegyületeikből elbontott reaktív ionok F^- , Cl^- bombázzák a hordozó felületét. Nagy anizotrópia érhető el: **DRIE** = Deep RIE 10-nél nagyobb oldalarányal.



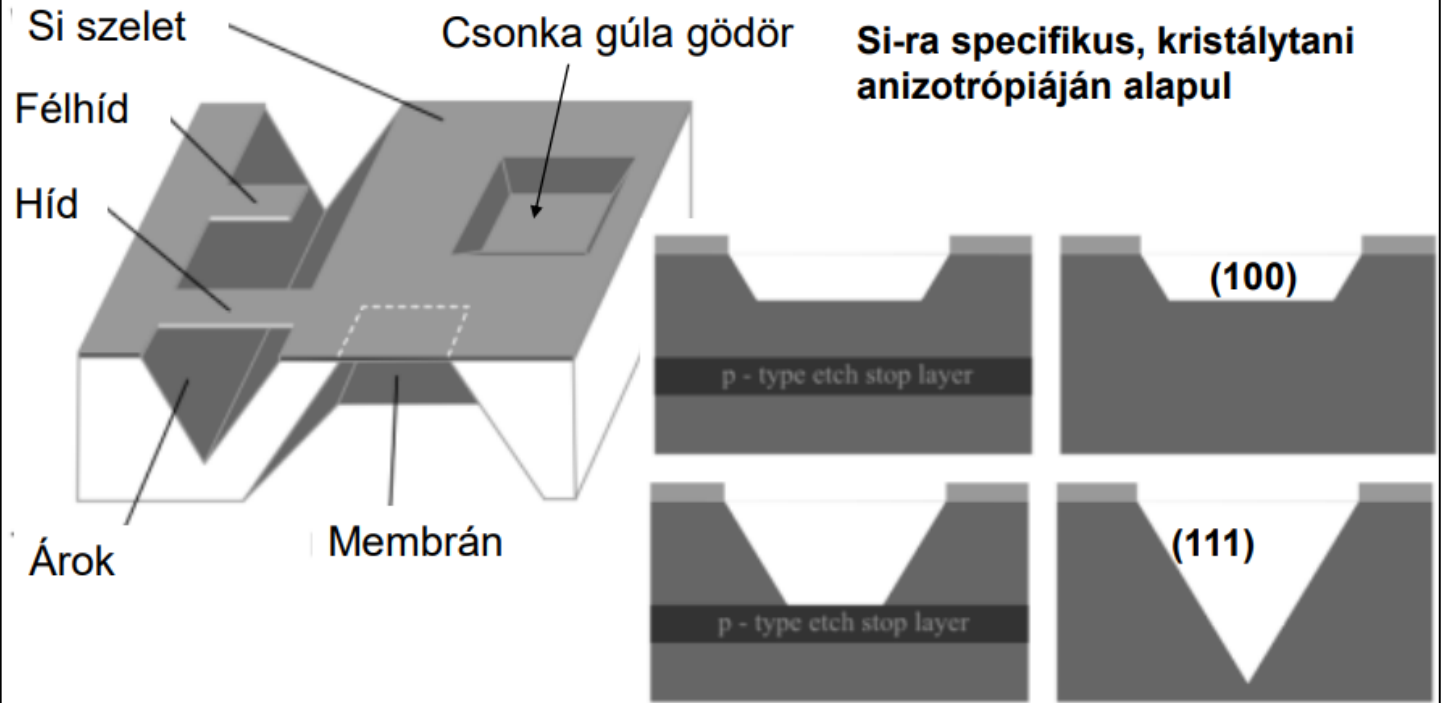
7. **Ismeresse egy pMOS tranzisztor előállításának technológiai folyamatait (főbb lépésekben)!**
 pMOS tranzisztor keresztmetszeti rajza a főbb funkcionális részek megnevezésével (2 pont). A főbb technológiai lépések megnevezése, részletezése (3 pont)



- | | |
|-------------------|---|
| Oxid növesztés | SiO ₂ növesztés a teljes felületen |
| Oxid maratás | Mintázat kialakítása a SiO ₂ rétegen |
| Vékony oxid | Vékony SiO ₂ réteg (gate oxid) növesztése a teljes felületen |
| Poli-Si felvitel | Polikristályos Si felvitele LPCVD eljárással |
| Poli-Si marás | Polikristályos Si gate elektród rajzolat kialakítása |
| Gate oxid maratás | Gate oxid maratása |
| P-zseb adalékolás | P-zseb adagolása ion-implantáció és diffúzió segítségével |
| Oxid növesztés | Vékony oxidnövesztés a teljes felületen |
| Hátoldal maratás | SiO ₂ és poli-Si maratása a szelet hátoldaláról |
| Ablak nyitás | Érintkező felület ablakok nyitása a SiO ₂ rétegen |
| Érintkező fémezés | Érintkezőfelület fémezés (pl. Al, Cu) felvitele |
| Érintkező maratás | Érintkezők kialakítása a fémezés maratásával |

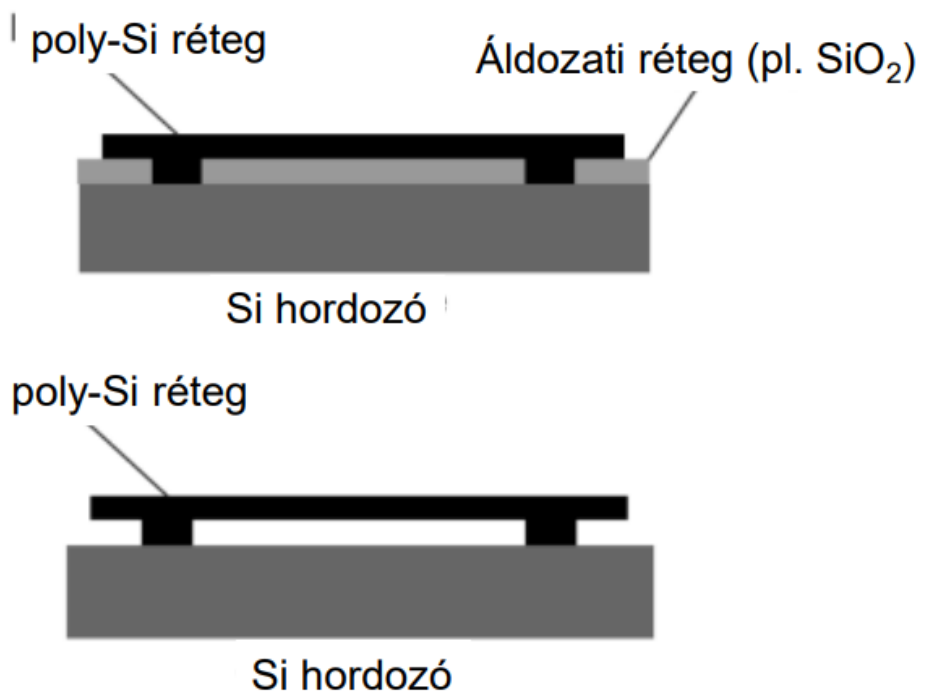
8. **Mutassa be ábrákkal a Si tömbi és felületi mikromechanikával létrehozható alkatokat.** Tömbi (3 pont) és felületi (2 pont) mikromechanikával létrehozható alkatok bemutatása és rövid jellemzése.

ALKALMAZÁS 2: TÖMBI MIKROMECHANIKAI ELEMÉK KIALAKÍTÁSA ANIZOTRÓPIKUS MARATÁSSAL MARATÁS MEGÁLLÍTÓ RÉTEG BEÉPÍTÉSÉVEL



ALKALMAZÁS 3: FELÜLETI MIKROMECHANIKAI ELEMÉK KIALAKÍTÁSA SZELEKTÍV MARATÁSSAL ÁLDOZATI RÉTEG BEÉPÍTÉSÉVEL

A Si esete példa, más anyagokkal is realizálható



G-01A - KRISTÁLYTANI ALAPISMERETEK:

1. Számítsa ki az (1 5 7) és a (2 4 5) síkok közötti szöget egy FKK rácsban! A számítás elvének ismertetése (2 pont), a számítás elvégzése (2 pont), az eredmény diszkussziója (1 pont)

SÍKOK SZÖGE KÖBÖS RENDSZERBEN

Két sík által bezárt szög:

mivel

$$(h_1 k_1 l_1) \perp [h_1 k_1 l_1] \text{ és } (h_2 k_2 l_2) \perp [h_2 k_2 l_2],$$

valamint

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = |\vec{r}_1| \cdot |\vec{r}_2| \cos \varphi ,$$

$$\cos \varphi = \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_1| \cdot |\vec{r}_2|} = \frac{h_1 \cdot h_2 + k_1 \cdot k_2 + l_1 \cdot l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}$$

1) (1 5 7) (2 4 5)

Skaláris szorzat:

$$a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3 = |a| \cdot |b| \cdot \cos \alpha$$

$$\underbrace{1 \cdot 2 + 5 \cdot 4 + 7 \cdot 5}_{42} = \underbrace{\sqrt{1^2 + 5^2 + 7^2}}_{5\sqrt{3}} \cdot \underbrace{\sqrt{2^2 + 4^2 + 5^2}}_{3\sqrt{5}} \cdot \cos \alpha$$

$$42 = 15 \sqrt{15} \cdot \cos \alpha \quad | : 15$$

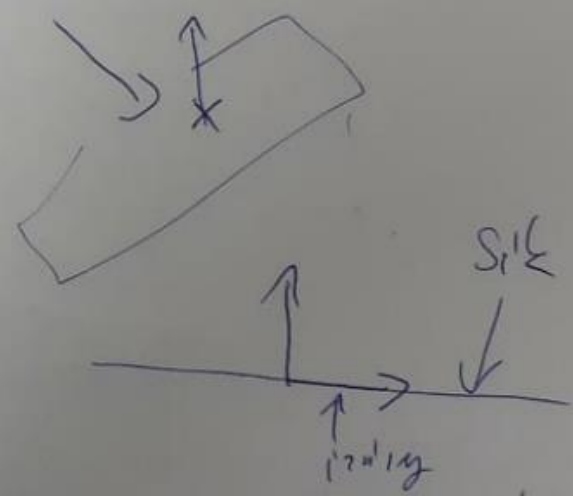
$$\frac{42}{15\sqrt{15}} = \cos \alpha$$

$$\alpha \approx 43,7^\circ$$

2. **Benne fekszik-e a [2 0 6] irány a (-3 5 1) síkban? Válaszát számítással indokolja!** A számítás elvének ismertetése (2 pont), a számítás elvégzése (2 pont), a helyes válasz (1 pont)

Ha [2,0,6] és (-3,5,1) merőlegesek, akkor igen, mert a (-3,5,1) az a sík normálvektora, és minden normálvektorra merőleges vektor része a síknak.

3.) Skaláris szorzat:

$$(2 \ 0 \ 6) \quad (-3 \ 5 \ 1)$$
$$a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3 = ? \cdot 0$$
$$\underbrace{2 \cdot (-3)}_{-6} + \underbrace{0 \cdot 5}_0 + \underbrace{6 \cdot 1}_6 = 0$$
$$0 = 0 \checkmark$$


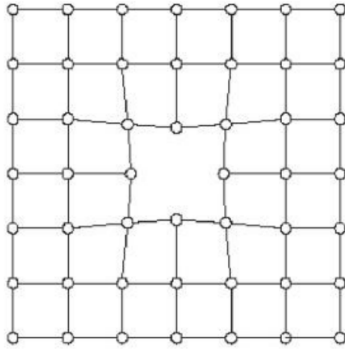
90° fokot zár be az irány a sík normál vektorával

G-01B - REÁLIS KRISTÁLYOK, RÁCSHIBÁK:

1. **Ismertesse a pontszerű rácshibákat! Térjen ki a keletkezési és eltűnési mechanizmusukra! Fejtse ki szerepüket az ötvözetekben!** Rácshibák ismertetése (3 pont), keletkezési mechanizmus (1 pont), hatásuk ismertetése ötvözetekben (1 pont)

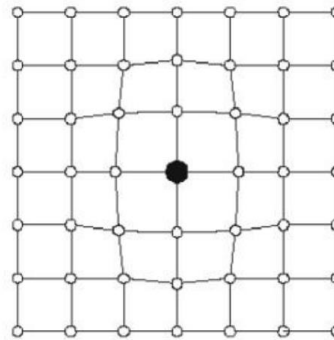
Pontszerű rácshibák:

VAKANCIA



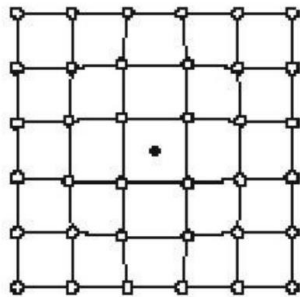
A vakancia egy atom hiánya a rácsból. A körülötte lévő atomokra ható vonzó és taszító erők megváltoznak, így a vakancia környezetében rácstorzulás lép fel.

SZUBSZTITÚCIÓS ATOM



A szubsztitúciós atom egy idegen atom a rácspontban. A körülötte lévő atomokra ható vonzó és taszító erők megváltoznak, így a szubsztitúciós atomkörnyezetében rácstorzulás lép fel.

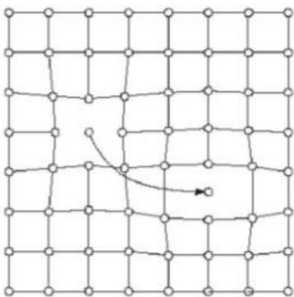
INTERSZTÍCIÓS ATOM



Az intersztíciós atom egy idegen atom a rácspontok között. A körülötte lévő atomokra ható vonzó és taszító erők megváltoznak, így az intersztíciós atom környezetében rácstorzulás lép fel.

FRENKEL-MECHANIZMUS

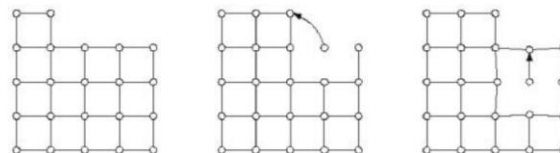
Vakancia és intersztíciós hiba mechanizmusa



Nagy energiaközlés, pl. részecske-besugárzás hatására egy rácsatom elhagyja a helyét, és intersztíciós helyzetbe kerül (saját intersztíciós atom). Rendkívül nagymértékű rácstorzulást okoz.

WAGNER-SCHOTTKY MECHANIZMUS

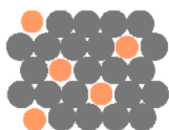
Vakancia mechanizmusa



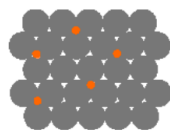
A szabad felületről atomok távoznak el, amelyek helyére az anyag belsejéből ugranak fel atomok, így tulajdonképpen egy vakancia diffundál az anyag belsejébe.

PONTHIBÁK ÖTVÖZETEKBE

- Szilárd oldat: alapfém (A) + oldott atom (B)



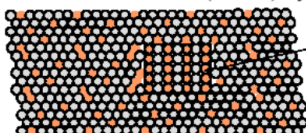
vagy



Szubsztitúciós szilárd oldat
(pl. Ni-alapfém + Cu-ötvöző)

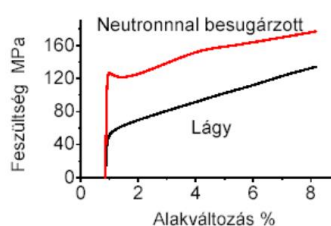
Intersztíciós szilárd oldat
(pl. Fe-alapfém + C-ötvöző)

- Szilárd oldatban (A + B) új második fázis is keletkezhet

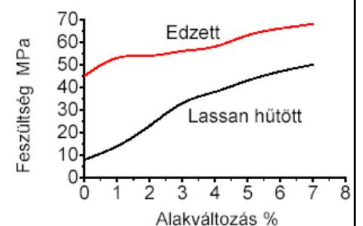


Második fázisú részecske
– különböző összetétel
– különböző szerkezet

PONTHIBÁK HATÁSA



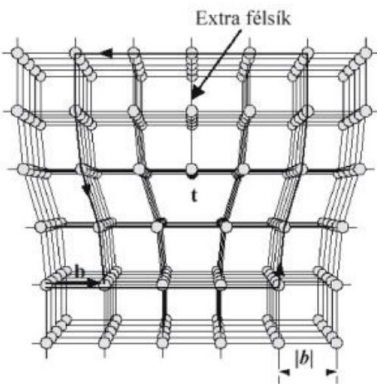
Alumíniumra



Rézre

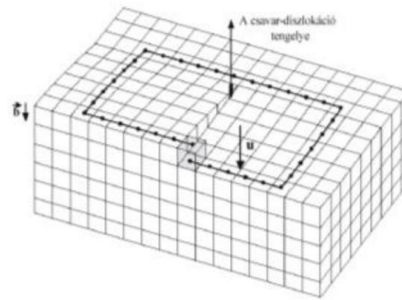
2. **Ismertesse a vonalszerű rácshibákat! Ismertesse szerepüket a képlékeny alakváltozás során!**
 Vonalszerű rácshibák ismertetése (2 pont), a vonalhibák mozgásának ismertetése (1 pont), képlékeny alakváltozás során betöltött szerepük (2 pont)

ÉLDISZLOKÁCIÓ



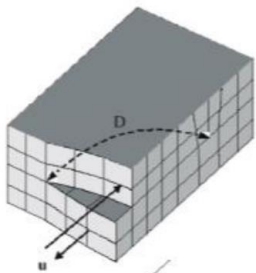
Diszlokáció vonala: l
 Beékelődött extra félsík alsó éle a diszlokáció.
 Burgers vektor: b
 $b \perp l$, azaz a diszlokáció vonala és az általa létrehozott elemi deformáció merőleges egymásra.

CSAVARDISZLOKÁCIÓ

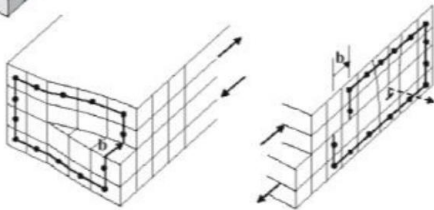


Diszlokáció vonala: l
 Burgers vektor: b
 $b \parallel l$, azaz a diszlokáció vonala és az általa létrehozott elemi deformáció párhuzamos egymással.

ÖSSZETETT DISZLOKÁCIÓ

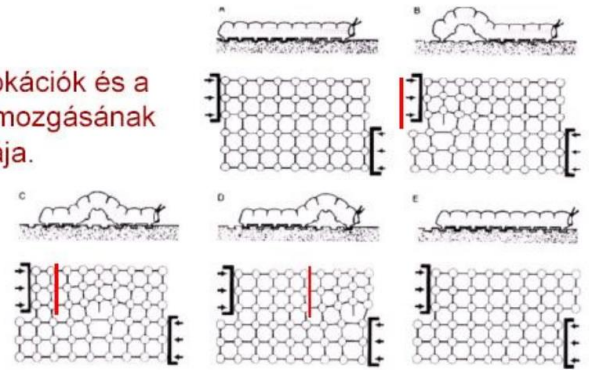


Részleges elcsúszás
 Térgörbe hálózat
 A diszlokáció vonala és az általa okozott elemi deformáció által bezárt szög 0 és 90° között van.



DISZLOKÁCIÓK MOZGÁSA

A diszlokációk és a heryő mozgásának analógiája.



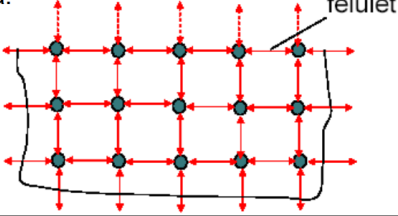
- Következtetés: a képlékeny alakváltozás során a kristálysíkok nem egy lépésben csúsznak el egymáson, hanem folyamatos mozgással, azaz lesznek olyan tartományok, ahol az elcsúszás már megtörtént, és lesznek olyanok, ahol még nem.

3. **Ismeresse a felületszerű rácshibákat!** Felületi rácshibák felsorolás és ismertetése (típusonként 1 pont)

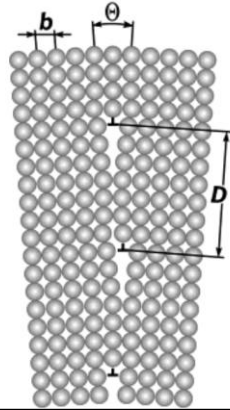
- FELÜLETSZERŰ RÁCSHIBÁK**
- Makroszkópikus felület
 - Kisszögű szemcsehatár
 - Nagyszögű szemcsehatár
 - Fázishatár (koherens, szemikoherens, inkoherens)
 - Ikerhatár
 - Rétegződési hiba

MAKROSZKÓPIKUS FELÜLET

- A kristály felületén az atomok magasabb energiaszinten vannak, mint a kristály belsejében, mivel nem jön létre minden irányban atomi kötés.
- A felület energiaszintje csökken, ha a felülethez újabb atomok kapcsolódnak.
- Oxidrétegek kialakulása.
- Kémiai reakciók.



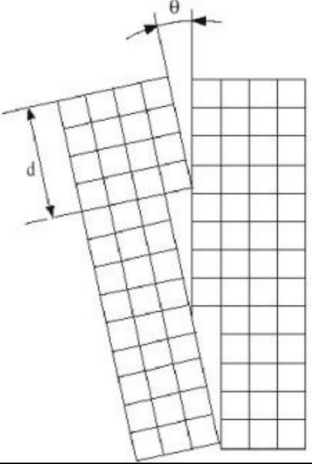
KISSZÖGŰ SZEMCSEHATÁR



Azonos előjelű diszlokációk egymás alá rendeződése

A kisszögű szemcsehatár által elválasztott tartományok orientációja közötti szöglkülönbség:
 $\Theta < 5^\circ$

NAGYSZÖGŰ SZEMCSEHATÁR



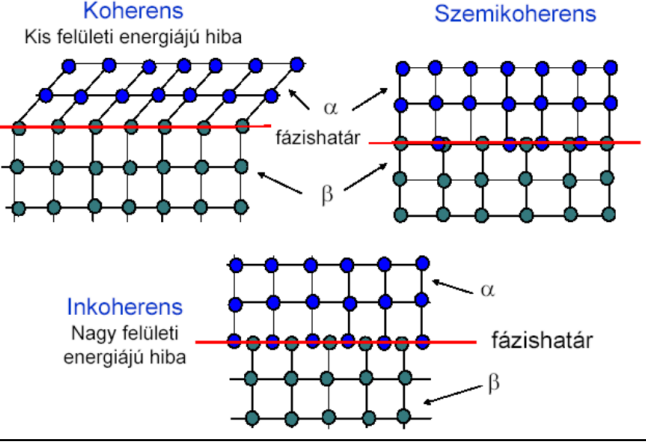
A dermedés során véletlen orientációjú kristálycsírák összenőnek. Az egyes szemcsék csak orientációjukban különböznek.

FÁZISHATÁROK

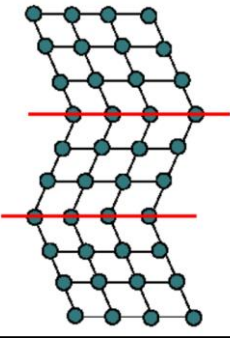
Koherens
Kis felületi energiájú hiba

Szemikoherens

Inkoherens
Nagy felületi energiájú hiba

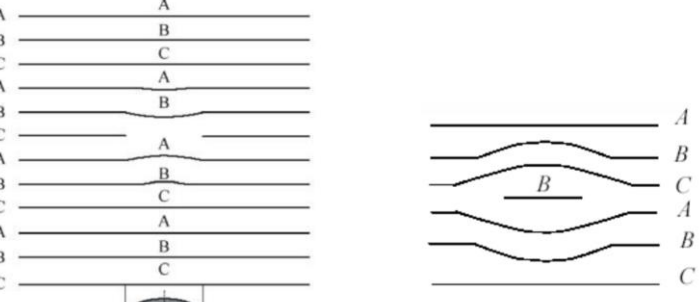


IKERHATÁR



- Koherens határ, mindkét oldalon azonos fázis van
- A határ két oldala egymás tükörképe
- Keletkezhet kristályosodáskor és képlékeny alakváltozáskor elsősorban az FKK és HCP (szorosan pakolt hexagonális) kristályokban

RÉTEGZÖDÉSI HIBA

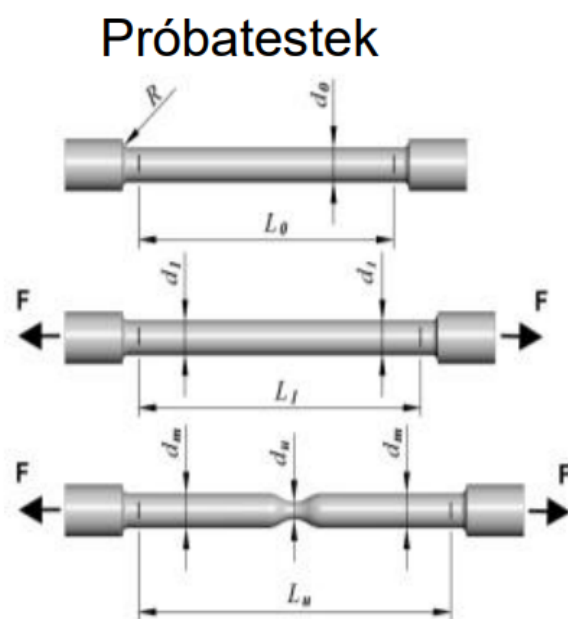
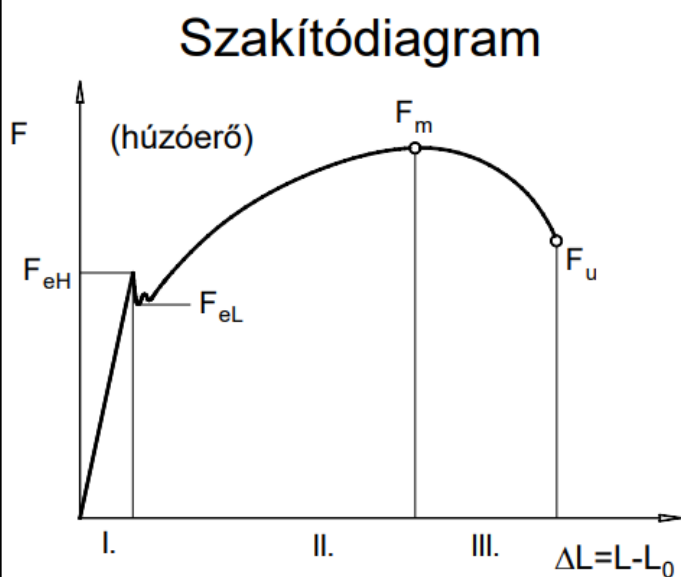


Atomok hiánya miatt jött létre (belső rétegződési hiba). Az atomhiány miatt megváltozik lokálisan a rétegződési rend.

Beékelődött atomok miatt jött létre (külső rétegződési hiba). A többlet-atomok miatt lokálisan megváltozik a rétegződési rend.

1. **Ismertesse a szakítóvizsgálatot és a belőle nyerhető szabványos mérőszámokat!** A szakító vizsgálat ismertetése rajzzal (3 pont). A szakítóvizsgálatból nyerhető szabványos mérőszámok (2 pont)

SZAKÍTÓVIZSGÁLAT



SZABVÁNYOS MÉRŐSZÁMOK

Feszültségi mérőszámok

Folyáshatár [MPa]

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

Szakítószilárdság [MPa]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Alakváltozási mérőszámok

Kontrakció

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \text{ [%]}$$

Szakadási nyúlás

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \text{ [%]}$$

2. **Ismeresse a mérnöki és a valódi rendszerben mért mechanikai tulajdonságok közötti különbségeket!** Az alakváltozásra vonatkozó különbségek (1 pont), a feszültségre vonatkozó különbségek (1 pont), Feszültség alakváltozás görbék és értelmezésük (3 pont)

• **Mérnöki rendszer**

• **Valódi rendszer**

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S} - 1$$

$$\sigma^M = \frac{F}{S_0}$$

Alakváltozás

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

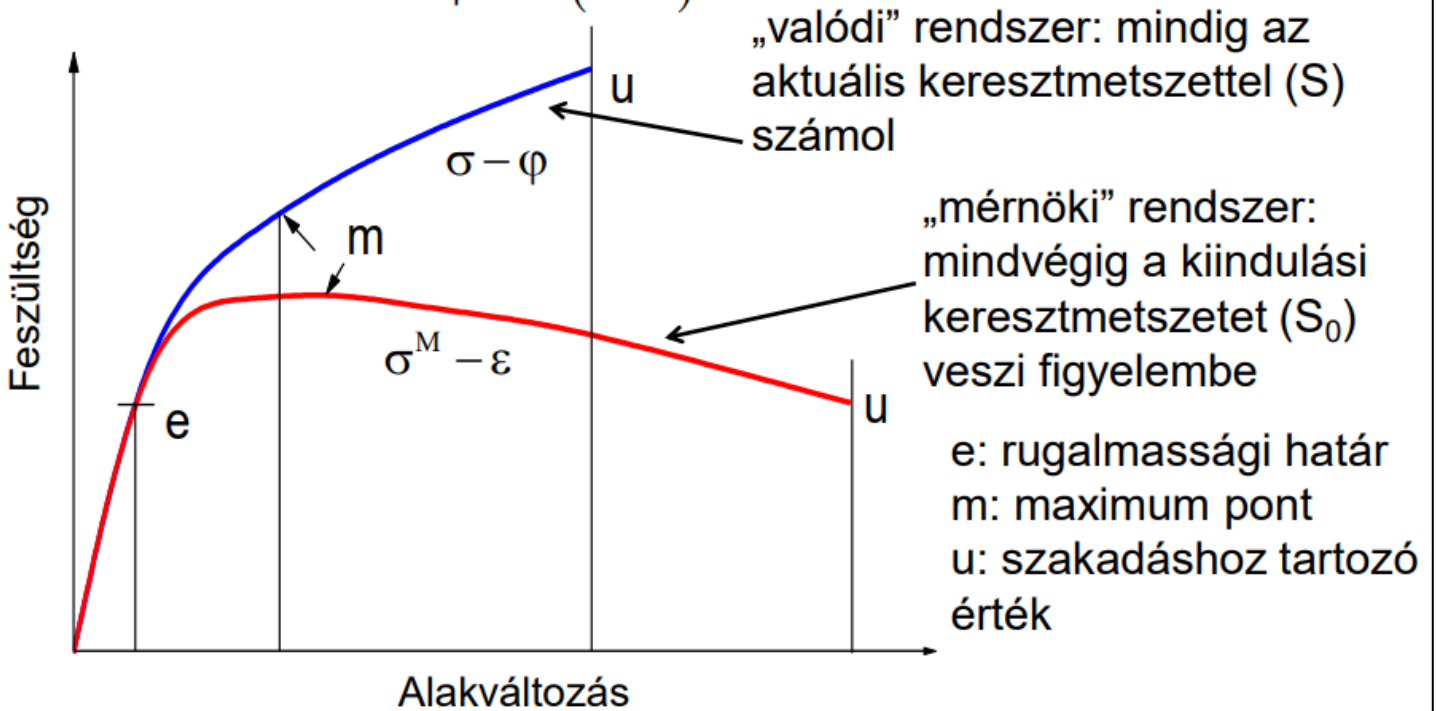
Feszültség

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

FESZÜLTSG-ALAKVÁLTOZÁS GÖRBÉK

$$F = \sigma S = \sigma^M S_0 \Rightarrow \sigma = \sigma^M (1 + \varepsilon)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$$



G-03 - ÖTVÖZETEK SZERKEZETE ÉS TERMIKUS VISELKEDÉSE, KRISTÁLYOSODÁS

1. **Milyen energetikai feltételei vannak a kritikus csíraméret létrejöttének? Hogyan határozhatjuk meg egy gömb alakú csíra kritikus méretét?** Kritikus csíraméret fogalma (1 pont), A csíraméret létrejöttének energetikai feltételei (2 pont), a kritikus csíraméret grafikus illusztrációja (1 pont), a kritikus csíraméret hőmérséklet függése (1 pont)

~~függvényében~~ Látható, hogy a szabadenergia csak egy meghatározott csíramérettől (r_{krit}) kezdve csökken, melyet a magképződés kritikus sugarának nevezünk. ~~Az új fázisnak csak ilyen, vagy ennél nagyobb sugarú magjai képesek~~

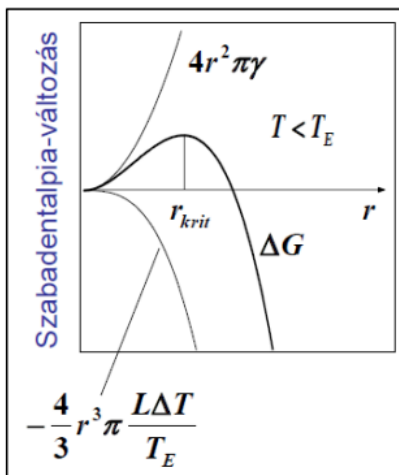
Kritikus csíraméret: Az a csíraméret, amelytől kezdve a szabadenergia csökken.

Térfogatváltozás esetén a szabadenergia-csökkenés $\Delta G_v \cdot \Delta V$ lenne, ha a két fázist elválasztó határ energiája nem nagyobb, mint a környezeté. A fázishatár azonban nagyon rendezetlen, atomjai részben a régi, részben az új fázisnak részei és mindez megnöveli a fázishatár szabadenergiáját. Tételezzük fel, hogy ez a határréteg elhanyagolható vastagságú és szabadenergiája felületegységenként γ felületi energia.

Innen a **kritikus csíraméret:**

$$r_{krit} = \frac{2\gamma}{\Delta G_v}$$

Az összefüggésben szereplő ΔG_v szabadenergia-csökkenés



11.4. ábra. A szabadenergia változása a csíraméret függvényében

Ezzel a kritikus csíraméret:

$$r_{krit} = \frac{2\gamma}{\Delta G_v} = \frac{2\gamma T_E}{L\Delta T}$$

ahol ΔT a technológiailag viszonylag jól kézben tartható **túlhűtés**.

2. **Ismertesse a szilárd oldatok, az intermetallikus vegyületek és az eutektikus ötvözetek legfontosabb tulajdonságait!** Szilárd oldatok (2 pont), Intermetallikus vegyületek (1 pont), eutektikus ötvözetek tulajdonságainak ismertetése (2 pont)

SZILÁRD OLDAT

Szilárd oldat: Olyan ötvözet, amelyben az ötvöző atomok beépülnek az alapfém rácsába, és az így létrejött szerkezet kristályrácsa az oldó anyagéval azonos.

Típusai: szubsztitúciós és intersztíciós szilárd oldat.

Korlátlan **szubsztitúciós** szilárd oldás feltételei:

1. Azonos kristályrács;
2. Közel azonos atomtérő (eltérés max. 14 %);
3. Az elektronaffinitási sorban ne álljanak túl messze egymástól, mert akkor ionvegyület jön létre;
4. Az oldó (A) és oldott (B) atom vegyértékelektronjainak száma azonos.

Ha a fenti feltételek teljesülnek akkor az eredő rácsállandó az alábbi empirikus összefüggéssel írható le, ahol α_A és α_B az alkotók rácsparamétere C_A és C_B a koncentrációk.

Vegard-szabály:
$$a_{\delta} = a_A(1 - C_B) + a_B C_B = a_A + C_B(a_B - a_A)$$

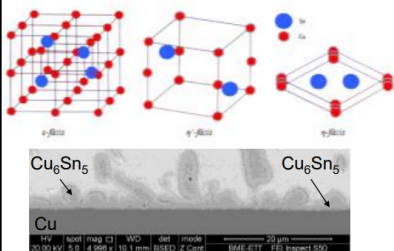
INTERSZTÍCIÓS SZILÁRD OLDAT

Az oldott elemek kis atomtérőjűek (H,O,N,C,B), és a rácsok hézagaiban helyezkednek el.

INTERMETALLIKUS VEGYÜLETEK

Nem áll fenn a szilárd oldat képződésének lehetősége. Az intermetallikus fázisok összetétele megfelel egy meghatározott A_mB_n atomaránynak, de előfordul, hogy oldják az alkotóikat.

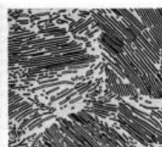
Rácsuk az alkotók rácsától eltérő szerkezetű. Kristályosodásuk állandó hőmérsékleten történik.



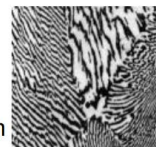
- Az elektronikai technológiában a réz-ón intermetallikus vegyületek jelenléte a forrasztás létrejöttének elsődleges mutatója.
- Három különböző kristályszerkezetű Cu-Sn:
 - η fázis – rendezett Cu_6Sn_5 .
 - η' fázis – rendezetlen Cu_6Sn_5 .
 - ϵ fázis – Cu_3Sn .

EUTEKTIKUM, EUTEKTOID

Ha az alkotók egymással sem szilárd oldatot, sem fémes vegyületet nem alkotnak, akkor az ilyen ötvözet a két alkotó kristályainak az elegyvé dermedhet. Folyadékból megdermedt heterogén szerkezet neve **eutektikum**, míg a szilárd állapotban keletkező hasonló szerkezet neve **eutektoid**. Heterogén kétfázisú szerkezetet alkotnak. A kristályosodástól függően lemezes, vagy szemcsés szerkezetűek lehetnek. Hasonlóan a szímfémekhez, állandó hőmérsékleten dermednek meg.



Fe-C eutektoid



Pb-Sn eutektikum