

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

Mintázat- és szerkezet-kialakítás félvezető szeleten

ELEKTRONIKAI ANYAGTUDOMÁNY (VIETAA01)

Kék háttér: nem törzsanyag

LITOGRÁFIA CÉLJA

- 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!

- Az IC-k esetében használt litográfia a NYHL-éhez alapelveiben hasonló, néhány különbséggel, amelyek a felbontást és precizitást növelik.



**Nyomdászati célú
nyomókő**

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

2. Reziszt „megvilágítása” (pl. fénnel, elektronsugárral...) „árnyékoló” maszkon keresztül

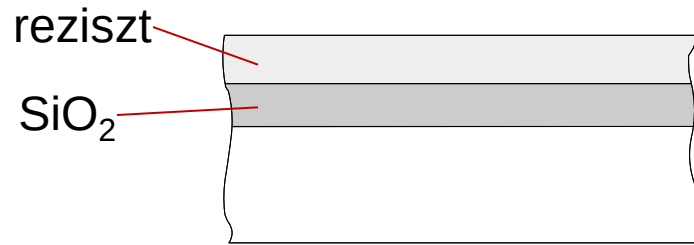
3. Előhívás (reziszt leoldása a mintázatnak megfelelően)

4. Mintázandó anyag marása

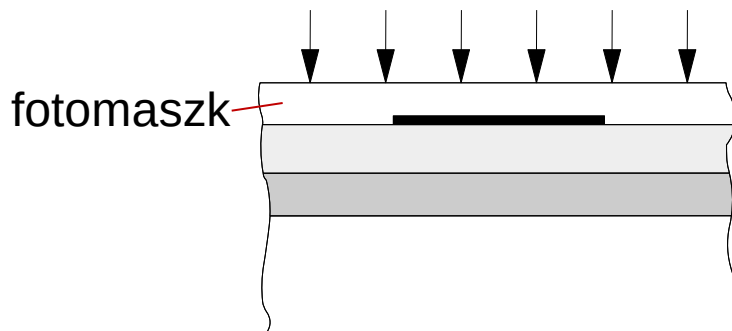
Lehet nedves vagy száraz maratással.

5. Maradék reziszt leoldása

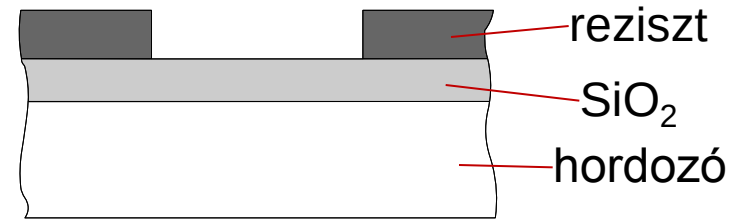
PÉLDA: OXIDMASZK KÉSZÍTÉSE ADALÉKOLÁSHOZ



1. Oxidnövesztés (réteggészítés)
2. Fotoreziszt felvitel



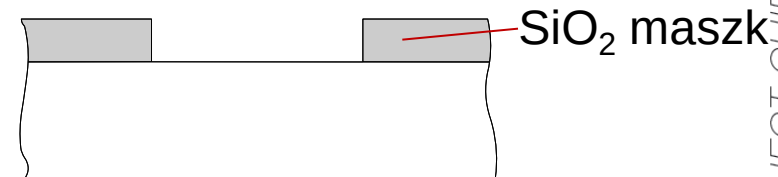
3. Maszkolás és exponálás



4. Előhívás



5. Az oxid marása



6. Reziszt leoldása

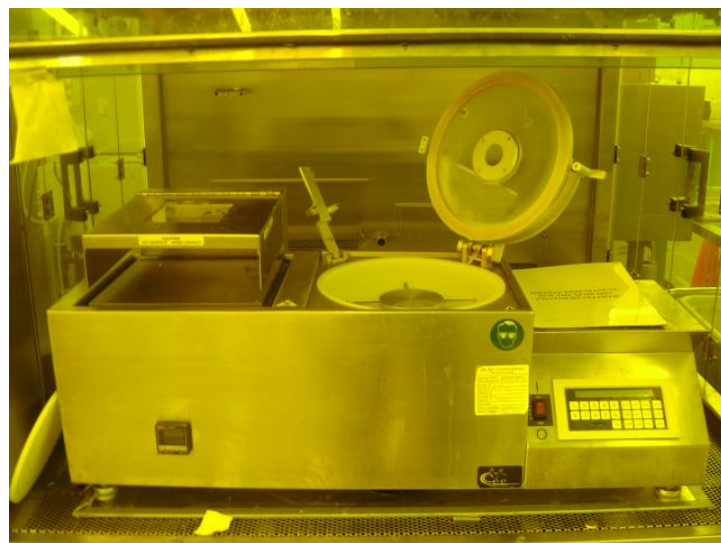
1. FOTOREZISZT FELVITELE

- 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.

- Előfűtés: Az oldószerek eltávoznak.



reziszt „spinner”

1. A REZISZTEK TÍPUSAI

Pozitív működésű reziszt:

Oldhatóvá válik, ahol az exponáló sugárzás érte.

Pozitív reziszt:

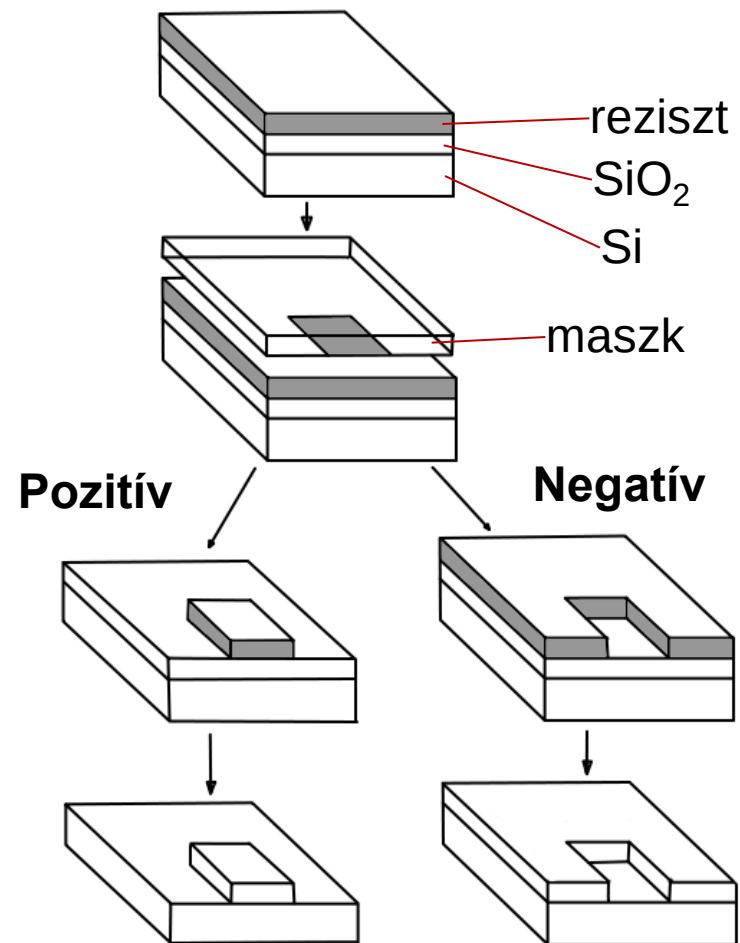
Azért pozitív, mert a maszk és a réteg mintázata megegyezik.

Negatív működésű reziszt:

Oldhatatlanná válik, ahol az exponáló sugárzás érte.

Negatív reziszt:

A maszk és a réteg mintázata egymás komplementere.



Pozitív és negatív reziszt SiO₂ oxidmaszk készítése esetében

2. EXPONÁLÁS

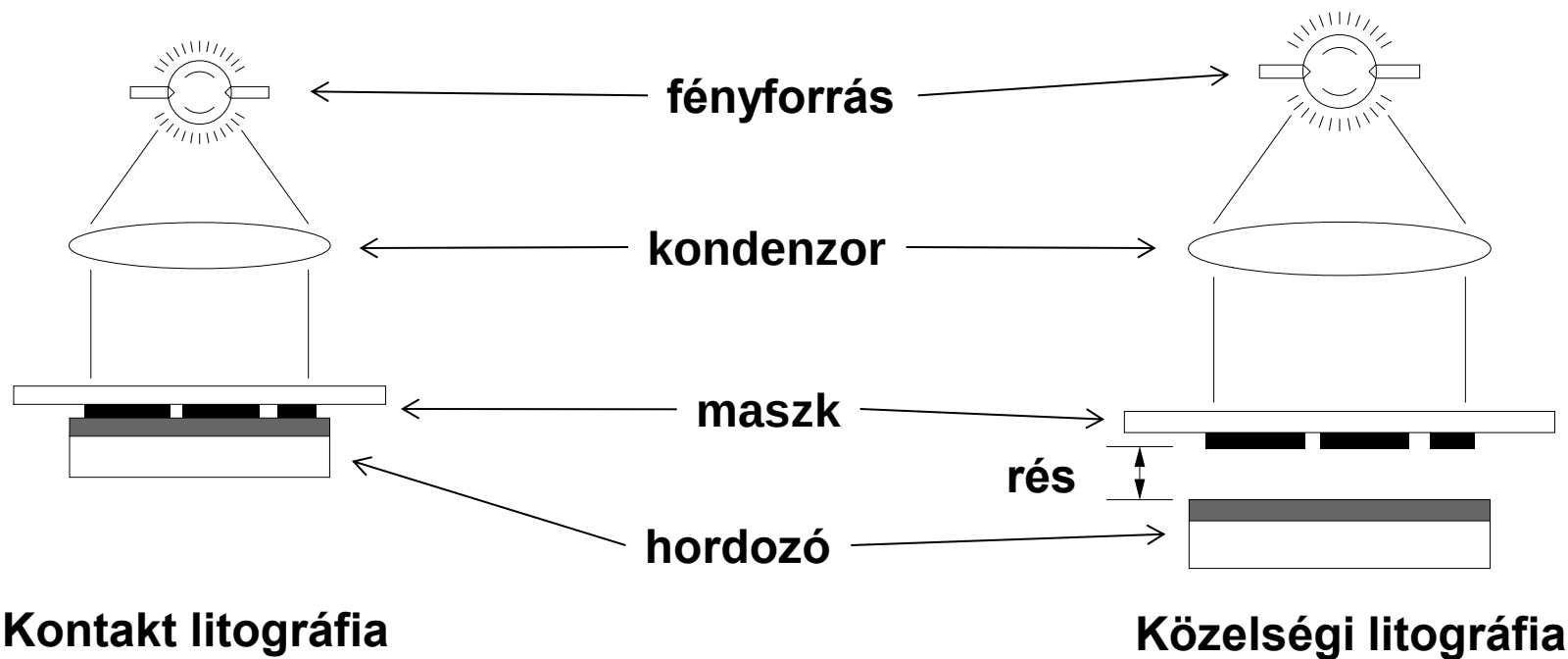
- Tipikusan UV fénnnyel világítjuk meg a rezisztet.

Fényforrások: higanygőzlámpa
UV vonala (kb. 400 nm),
excimer lézerek
(KrF: 248 nm, ArF: 193 nm)



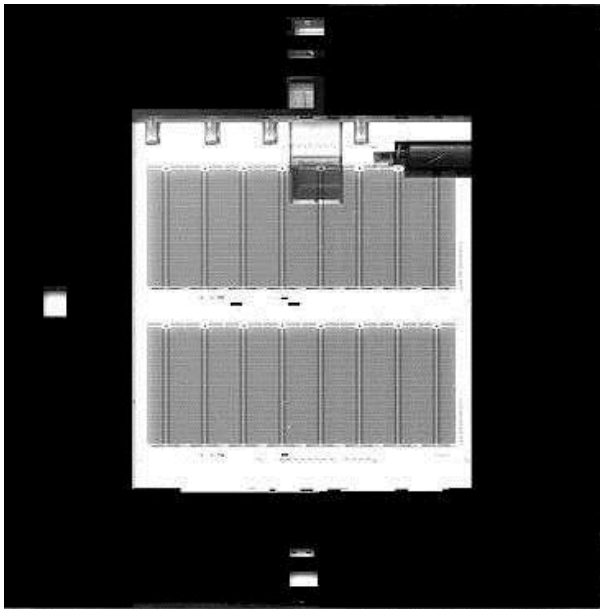
- Az optikai elemek speciális anyagúak, amelyek nem nyelnek el az adott hullámhosszon.
(pl. kalcium-fluorid)
- A lencserendszer és a szelet között immerziós folyadékkal növelhető a felbontás

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

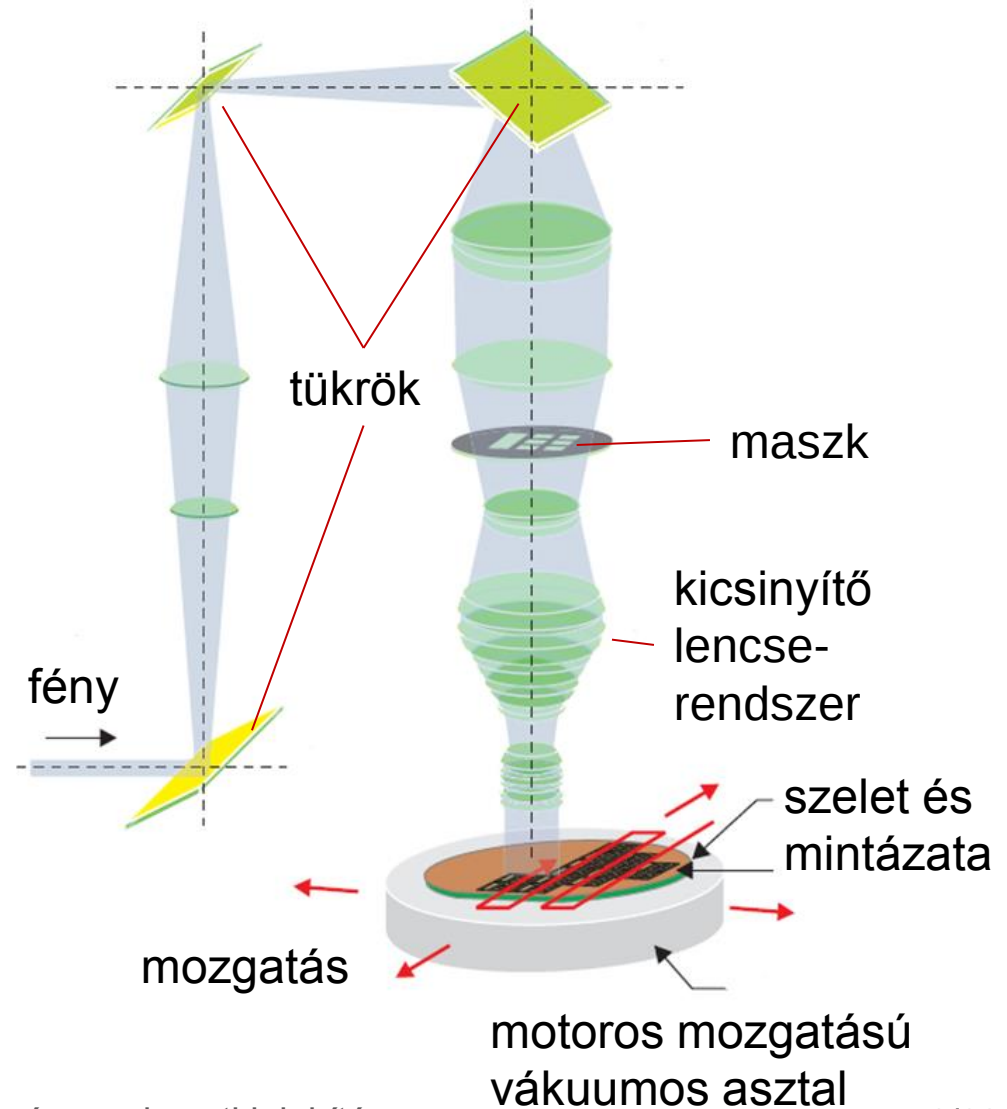


- Rés alkalmazásának előnye: nem sérül a maszk
- Hátránya: a fény szóródással behatol nem kívánt területekre is

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



- Maszk: elektronsugárral mintázott króm bevonat kvarcüvegen

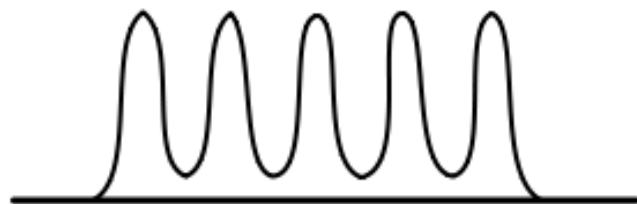


2. RAJZOLAT KIALAKÍTÁSA – HAGYOMÁNYOS MASZKOK



kvarc lemez (átlátszó)

króm maszk (nem átlátszó)



Fényhullám térerősség



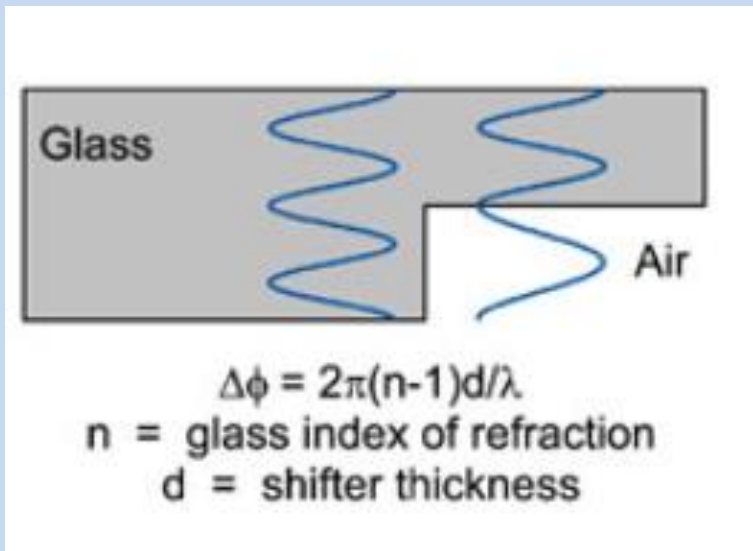
Energia (intenzitás) eloszlás

Reziszt exponálási határa

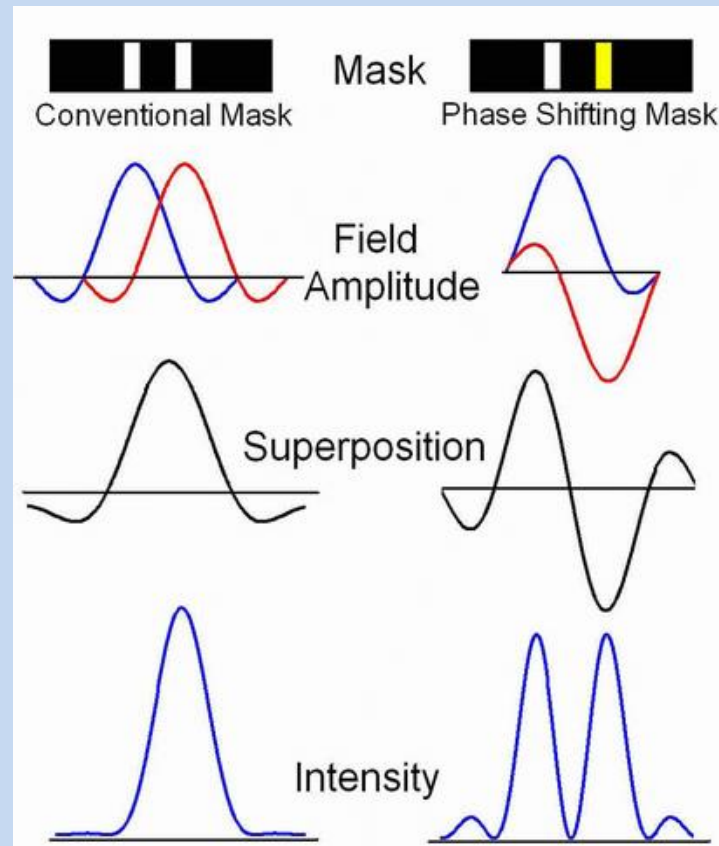


Reziszt előhívás után (fala nem függőleges, limitált a felbontás, max 50nm)

2. RAJZOLAT KIALAKÍTÁSA – FLEBONTÁS JAVÍTÁSA FÁZISTOLÁSSAL



**180°-os fázistolásnál a
tézerősség előjelet vált**

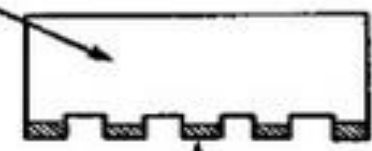
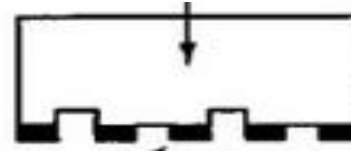
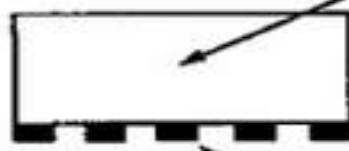


FÁZISTOLÓ MASZKOK

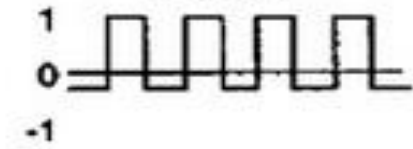
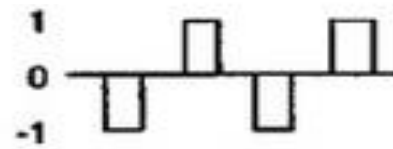
Hagyományos bináris

Alternáló fázistoló

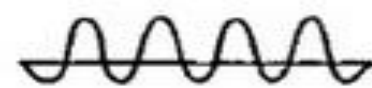
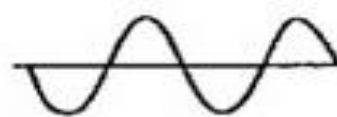
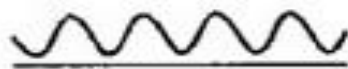
Csillapított fázistoló



Térerősség
a maszkon



Térerősség
a szeleten

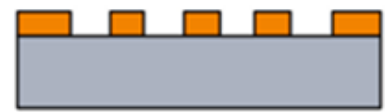


Intenzitás
a szeleten

Exponálási küszöb



Reziszt
a szeleten



2. RAJZOLAT KIALAKÍTÁSA – SPECIÁLIS FÁZISTOLÓ MASZKOK

Jellemzők:

- A fény útjában a kvarc átereszt, a króm nem.
- Alternáló fázistolás: a kvarc lemezbe felületi struktúrát marnak, melyben vannak olyan tartományok, amelyek 180° -os fázistolást végeznek a fény hullámában (alternating phase shifting).
- Csillapított fázistolás: egy mintázott, alacsonyabb áteresztésű fázistoló réteget is beiktatnak (attenuated phase shift)
- Nagyobb felbontás biztosítható.
- Előhívás után a reziszt fala jobban közelíti a függőlegest.
- Bonyolult technológia, a maszkot is litografálni kell!!

2. EXPONÁLÁS: FÉNYFORRÁSOK ÉS FELBONTÁS

- Az elérhető felbontást a fény diffrakciója korlátozza.
- A felbontás elvi korlátja:

$$d = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

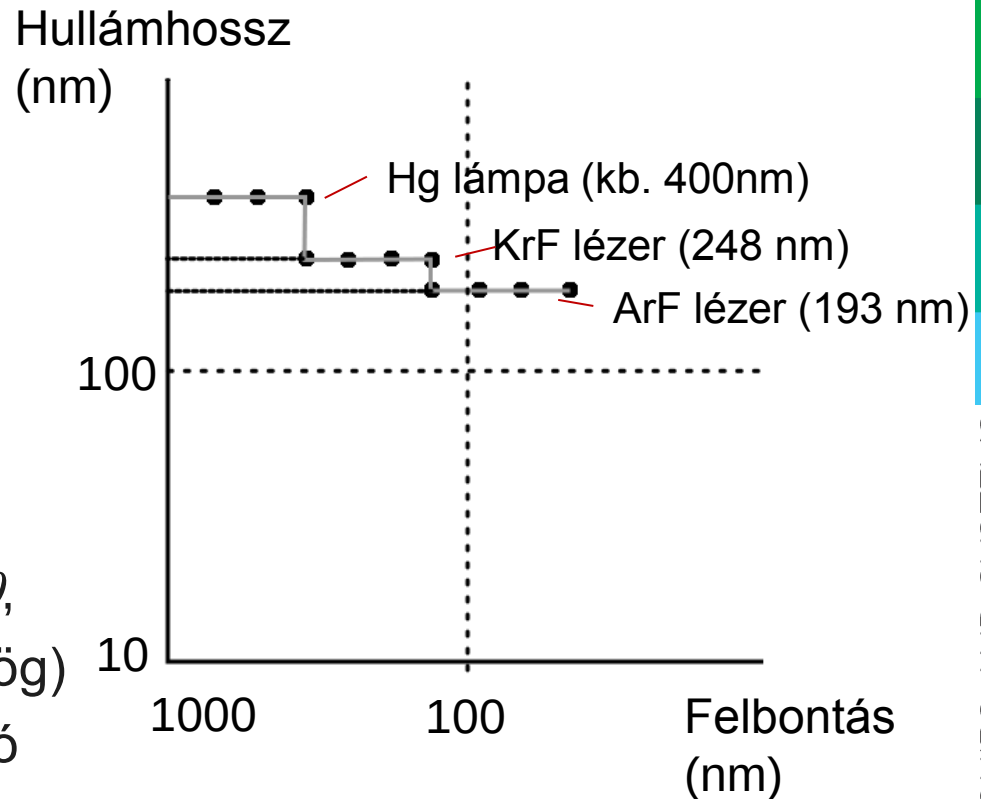
λ : hullámhossz,

NA: numerikus apertúra= $n \sin \theta$,

(n -törésmutató, θ – félnyílásszög)

k_1 : elrendezéstől függő állandó

- Javítani lehet:
 - a hullámhossz csökkentésével
 - az NA növelésével (pl. immerziós folyadék alatt)
 - k_1 növelésével (fázismaszkok, egyéb trükkök)



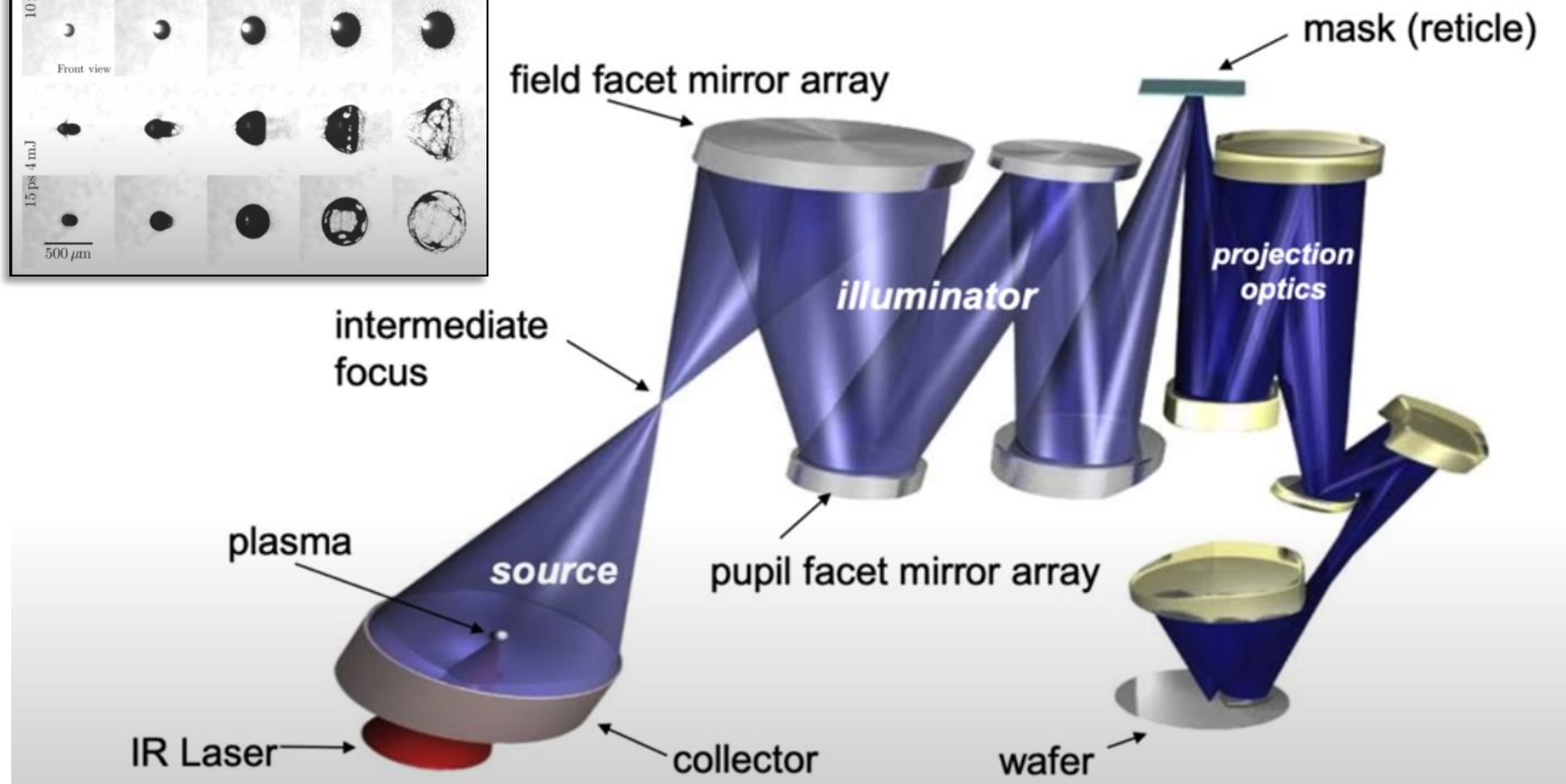
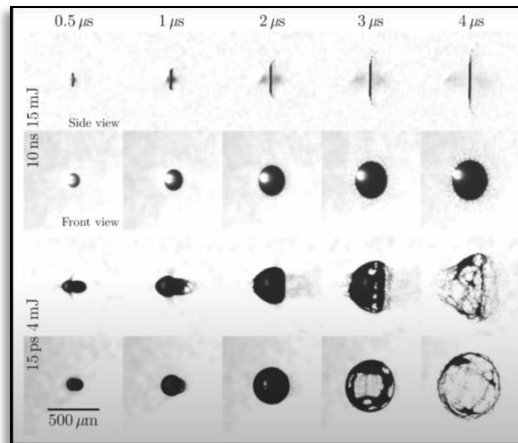
2. EXPONÁLÁS NANOTAROMÁNYBAN:

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)

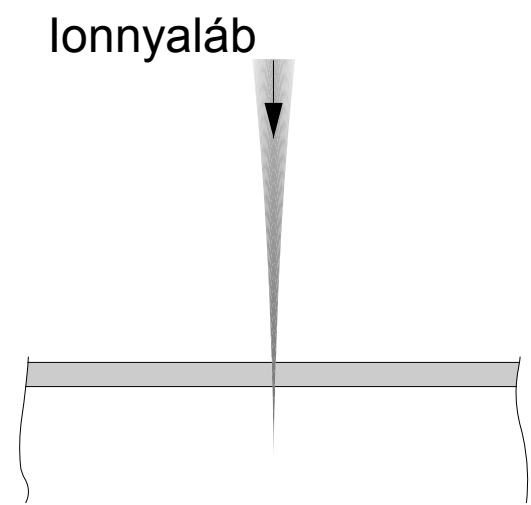
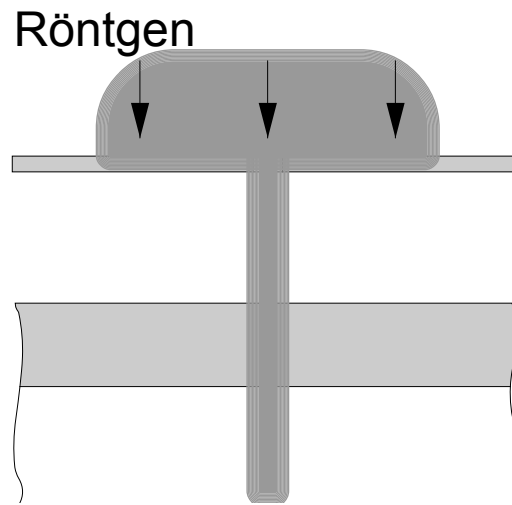
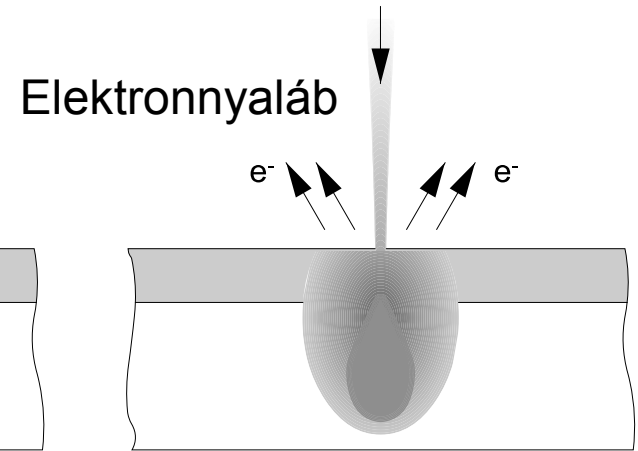
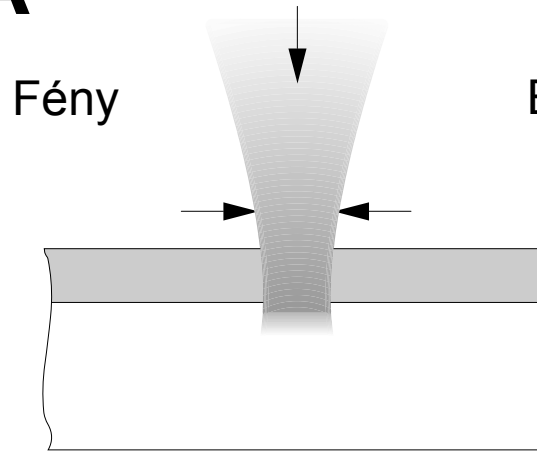
EUV LITOGRÁFIA



2. NANOMÉRETŰ MASZK ÉS SZELET LITOGRÁFIA

Sugárzások alkalmazása:

- fény (VIS- $\rightarrow$ EUV, egyre alacsonyabb hullámhosszakkal),
- elektronsugár,
- röntgensugár,
- ionsugár.

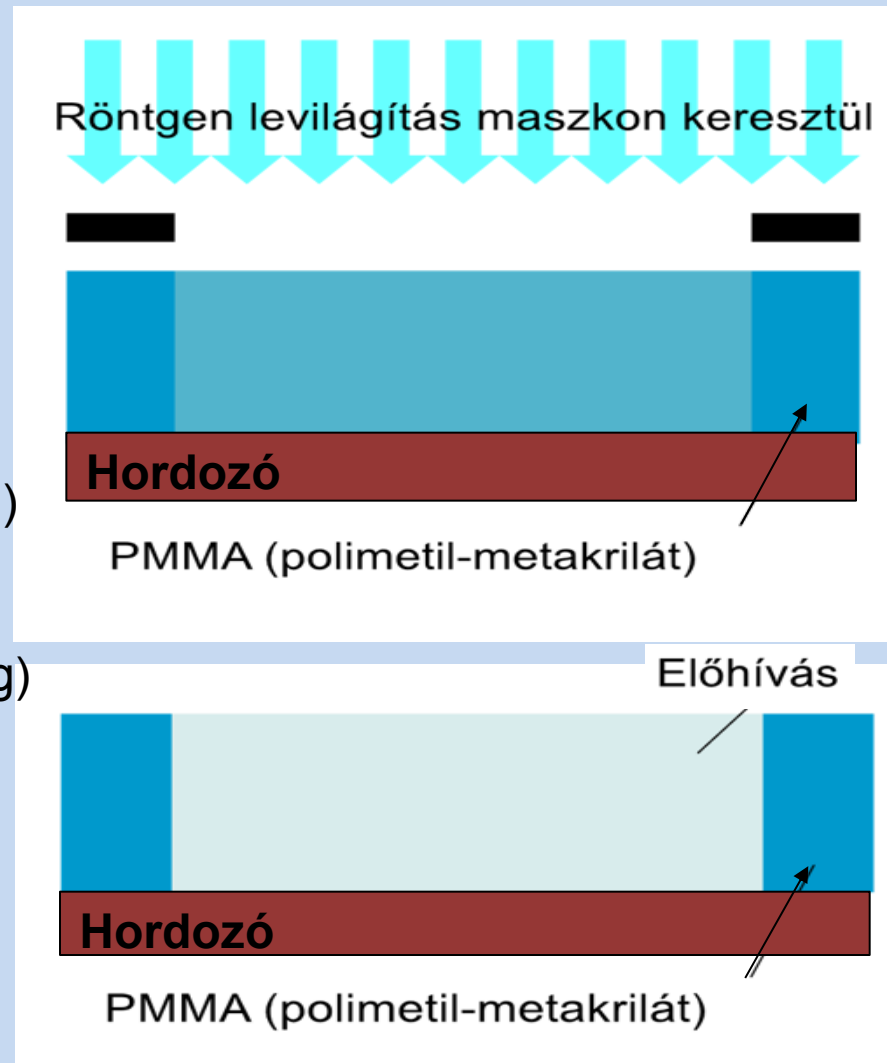


2. LITOGRÁFIÁK

- 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 ($<10\text{nm}$), maszk nélküli eljárás
 - hátrány: elektromágneses optika szükséges, vákuumot igényel, tömeggyártásra nehezen alkalmazható
- Röntgensugárral:
 - előny: nagyon jó felbontás érhető el nagy mélységben is ($<10\text{nm}$)
 - hátrány: kollimátoros (maszkolt) v. refraktív nyalábformálás
- Ionsugárral:
 - előny: nagyon jó felbontás érhető el ($<10\text{nm}$), közvetlen rétegmegmunkálás lehetséges
 - hátrány: elektromágneses optika szükséges, vákuumot igényel, egyedi gyártásra alkalmas, roncsolást okozhat a felületen.
- *Egyéb nano-litográfiák (Részletesebben I. Nanotudomány)*

2. RÖNTGENSUGARAS LITOGRÁFIA

- 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*)



2. ELEKTRONSUGARAS LITOGRÁFIA (ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY, EBL)

Az elektronsugaras litográfia felbontóképessége:

Az elektronok ekvivalens hullámhossza DeBroglie alapján: $\lambda = mv/h$
ahol h a Planck állandó, m az elektron tömege.

A sebesség (v) kifejezhető a gyorsítófeszültséggel: $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$

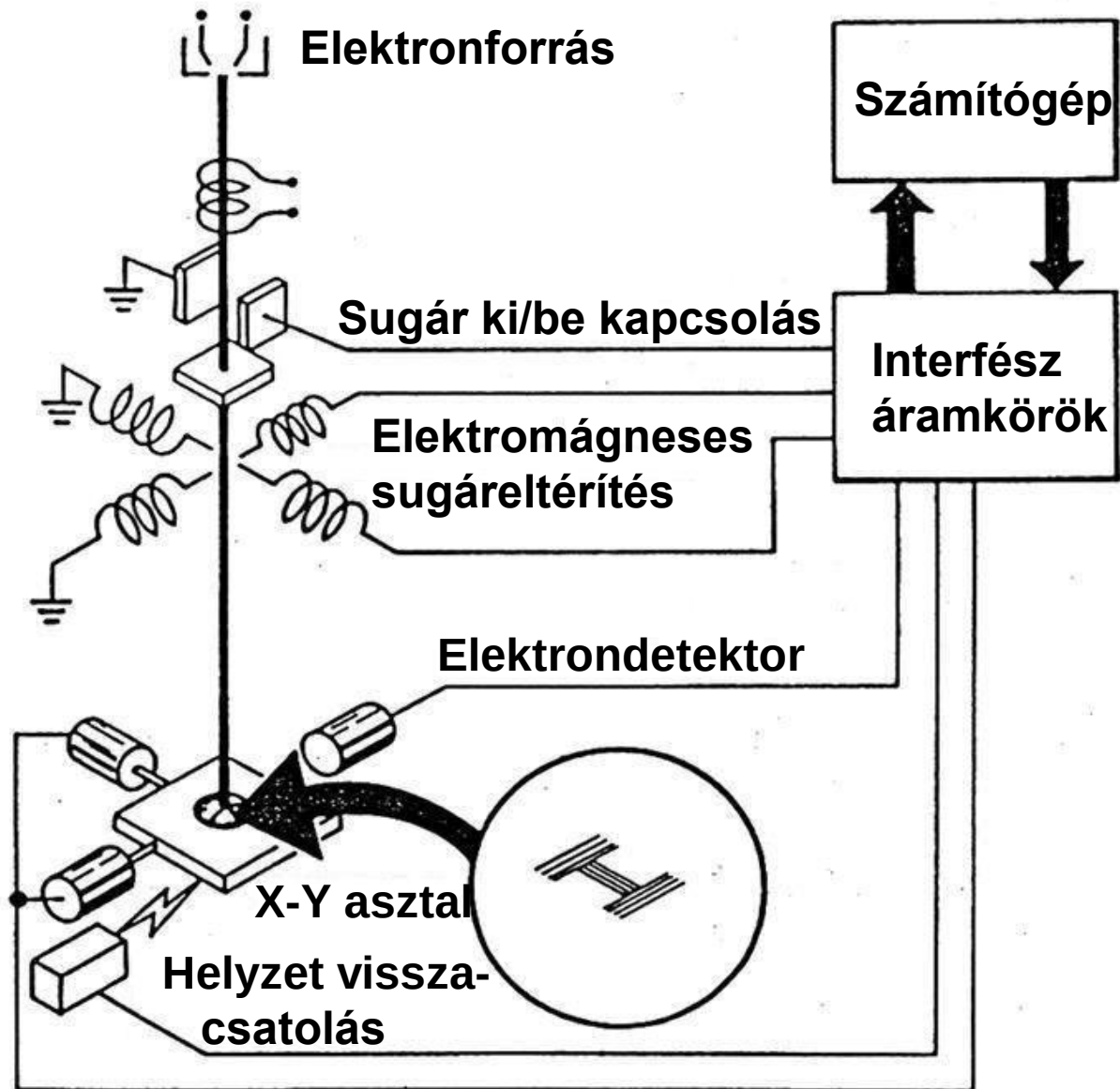
Innen 1 kV gyorsító feszültséggel ez = 0.0387 nm.

Az elvi felbontóképesség a pm-es nagyságrendbe esik, de technikai limittek miatt ez nagyságrendekkel rosszabb, mégis a a nm tartományba hozható.

A mintára eső elektronsugár által keltett visszaszórt elektronokat detektálva a minta pásztázó elektronmikroszkópos képe is megjeleníthető (I. SEM)
A minta helyzetét igen lézer interferométer segítségével.

Termelékenysége általában kisebb, mint a fotolitográfiáé,
gyakran a két módszer kombinációját használják

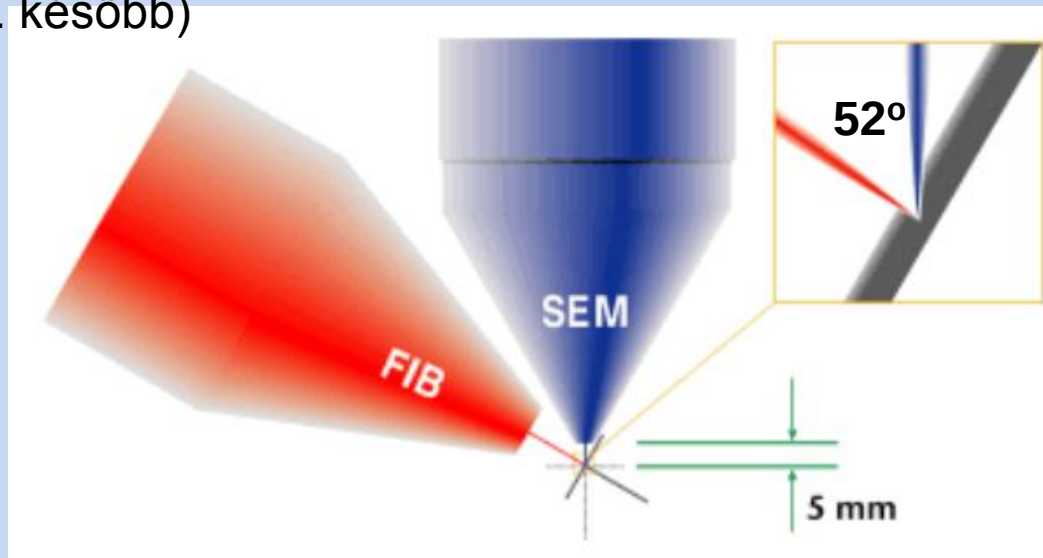
2. ELEKTRONSUGARAS LITOGRÁFIA (ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY, EBL)



Mintázat- és szerkezetkialakítás

2. IONSUGARAS LITOGRÁFIA

- Ionsugaras expozíció (pl. He^+).
- A fókuszált ionsugár (Ga^+) litográfia (focused ion beam lithography) elvében hasonló az elektronlitográfiához.
- A reziszt anyagok az ionokra érzékenyebbek.
- Az ionok energiája nagyobb, ezért az érzékenység egy-két nagyságrenddel megnőhet.
- Az anyagokba behatoló ionok szórt elektront keltenek, ez javítja az exponálás minőségét.
- A behatolási mélység állítható az ionok energiájának változtatásával.
- A litográfiás célra kialakított ionforrás használható ionimplantálásra is.
- Közvetlen ionos megmunkálásra szolgáló fókuszált ionsugár (FIB) és pásztázó elektronmikroszkóp (l. később) (SEM) építhető össze egy készülékben.



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

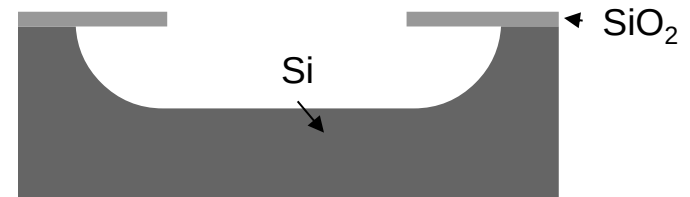
Marószer anyaga alapján:

- nedves maratás – általában izotróp, de Si-hoz léteznek anizotróp nedves marószerrek
- száraz maratás – általában anizotróp

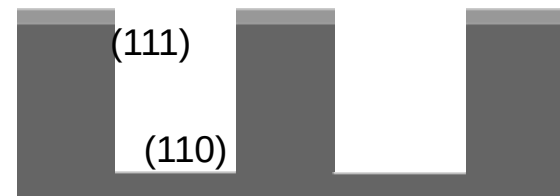
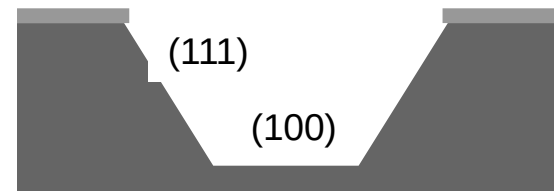
Szilícium (Si) maratószerrei:

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

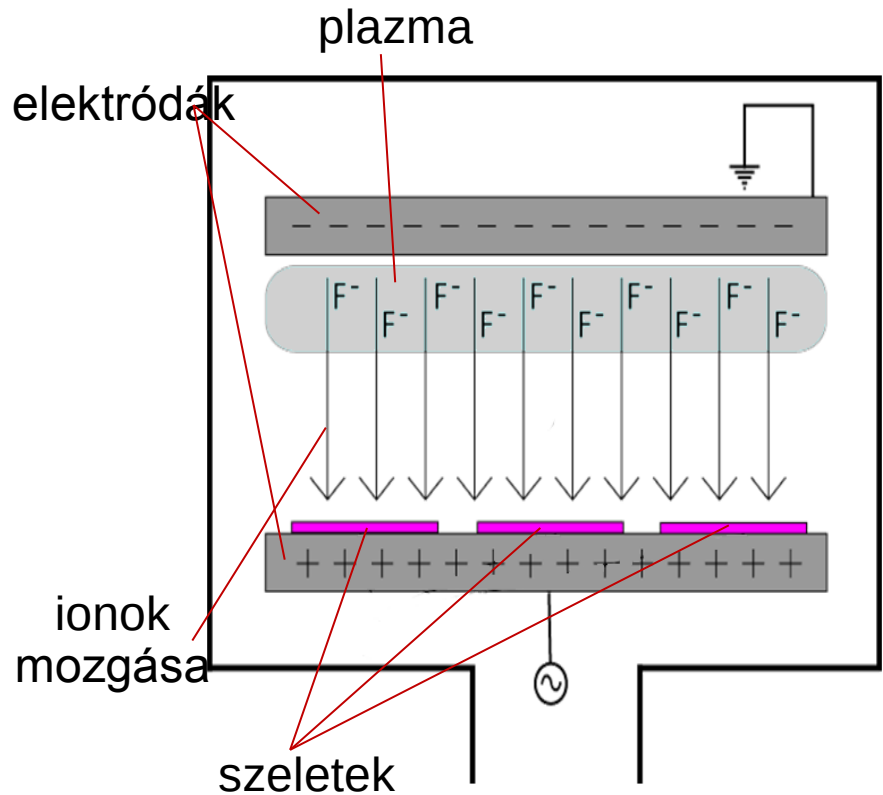
Plazma maratás (PE = Plasma Etching): RF gerjesztéssel alacsony nyomáson (0,1-5 Torr, néhány 100 Pa) **plazmát** állítanak elő - a plazmában keletkező szabad gyökökkel bíró semleges gázcsovecskékkel (F, CF₃, O) kémiai reakció megy végbe a hordozón illékony terméket eredményezve. A marási profil izotróp v. (mélységi) anizotróp.

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

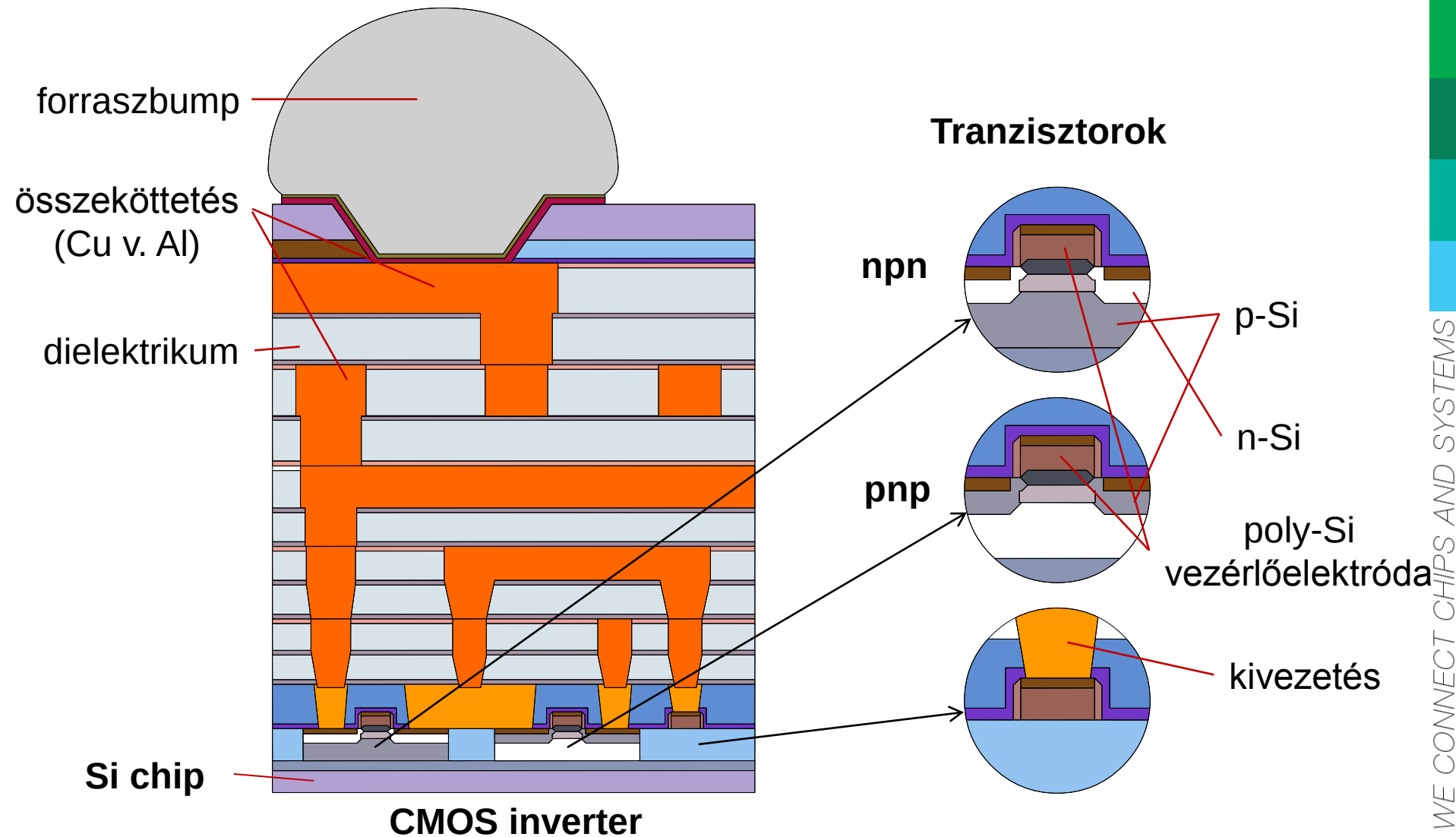
Ionsugaras maratás (IBE = Ion Beam Etching): fizikai maratás ionágyúval, igen anizotróp. (FIBE=Focused Ion Beam Etching)

4. A MINTÁZANDÓ ANYAG MARÁSA SZÁRAZ MARÁS TÍPUSOK

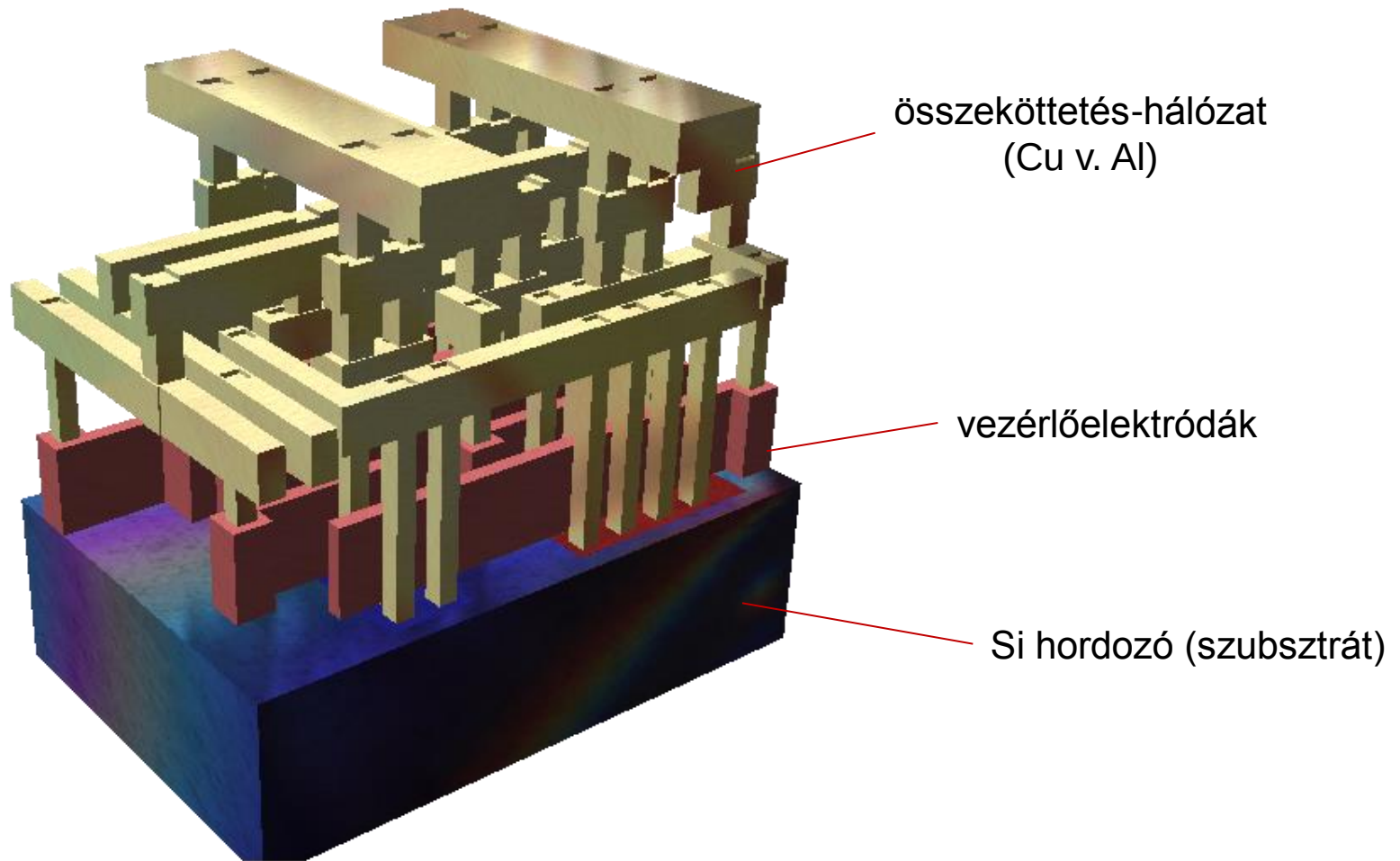
Reaktív ionmaratás (RIE = Reactive Ion Etching): a plazmamarás ionokkal segített változata 10^{-3} - 10^{-1} Torr nyomáson, ahol vegyületeikből elbontott reaktív ionok F^- , Cl^- bombázzák a hordozó felületét. Nagy anizotrópia érhető el: **DRIE** = Deep RIE 10-nél nagyobb oldalaránnyal.



EGY MODERN IC SZERKEZETE (KERESZTMETSZET)



EGY MODERN IC SZERKEZETE (3D)



INTEGRÁLT ÁRAMKÖRÖK TECHNOLOGIÁJA

„Síkbeli” (planáris) gyártási eljárás:

A szelet felületén található összes chip kialakítása **egyidejűleg történik.**

Az építkezés lépései:

Félvezető, fém, és szigetelő rétegek egymásra történő leválasztása, adalékolása, és rajtuk a kívánt mintázat kialakítása.

A legtipikusabb anyagok:

- Si szubsztrát – adalékolva a kívánt területeken
- SiO_2 szigetelő rétegek (vagy „high-k”, ill. „low-k” dielektrikumok)
- Si_3N_4 passziváló réteg
- Polikristályos Si – kapuelektrodák
- Fém vezetékezés és kontaktusok (Cu v. Al)
- PSG (foszfoszilikát üveg) a fém vezetékezés rétegek között

RÉTEGLEVÁLASZTÁS ÉS EPITAXIA

- **Rétegleválasztás**: olyan eljárás, mely során a hordozóra (szubsztrátra) nagy felületű, de laterális méretéhez viszonyítva nagyságrendekkel kisebb vastagságú, egyenletes réteget viszünk fel.
 - A félvezetők esetében mintázatot is tudunk kialakítani, ha kombináljuk litográfiával és maratással. Így hozzuk létre pl. a Si chipen az átvezetéseket.
 - Speciális eset: epitaxia – egykristályos réteg előállítása egykristályos rétegen

PVD – FIZIKAI GŐZFÁZISÚ LEVÁLASZTÁS

- A réteg anyagát (anyagait) energia-befektetéssel gőz vagy gáz fázisba visszük, ami kondenzálódik a hordozón (pl. Si chipék Al fémezése).
- Két alapvető típusa van:
 - vákuumpárologtatás,
 - vákuumporlasztás.

(Részletesebben I.: Vékonyrétegek technológiája.)

Fontos! A CVD-vel ellentétben nincs a felületen kémiai reakció, ezért maga az elv is egyszerűbb.

CVD – KÉMIAI GŐZFÁZISÚ LEVÁLASZTÁS

- A PVD-vel ellentétben kémiai reakció játszódik le a felszínen
- A kiindulási anyagok (gázok) gyakran veszélyesek (robbanásveszély, mérgező, stb.)

A kiindulási anyagok összefoglaló neve: **prekurzor** gázok.

Példa prekursor gázokra:

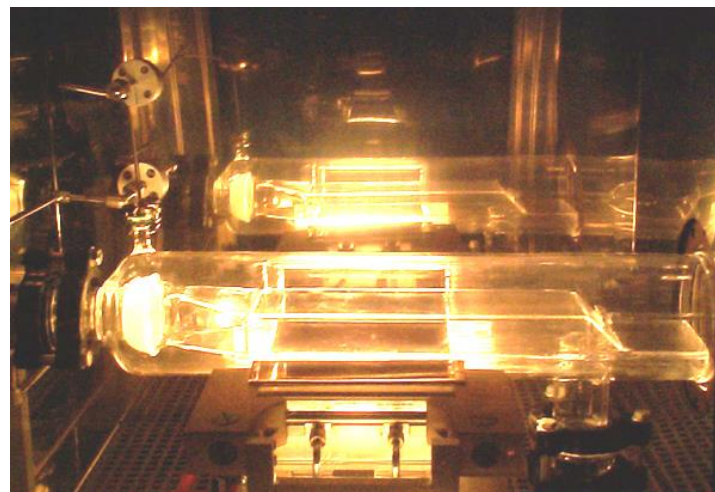
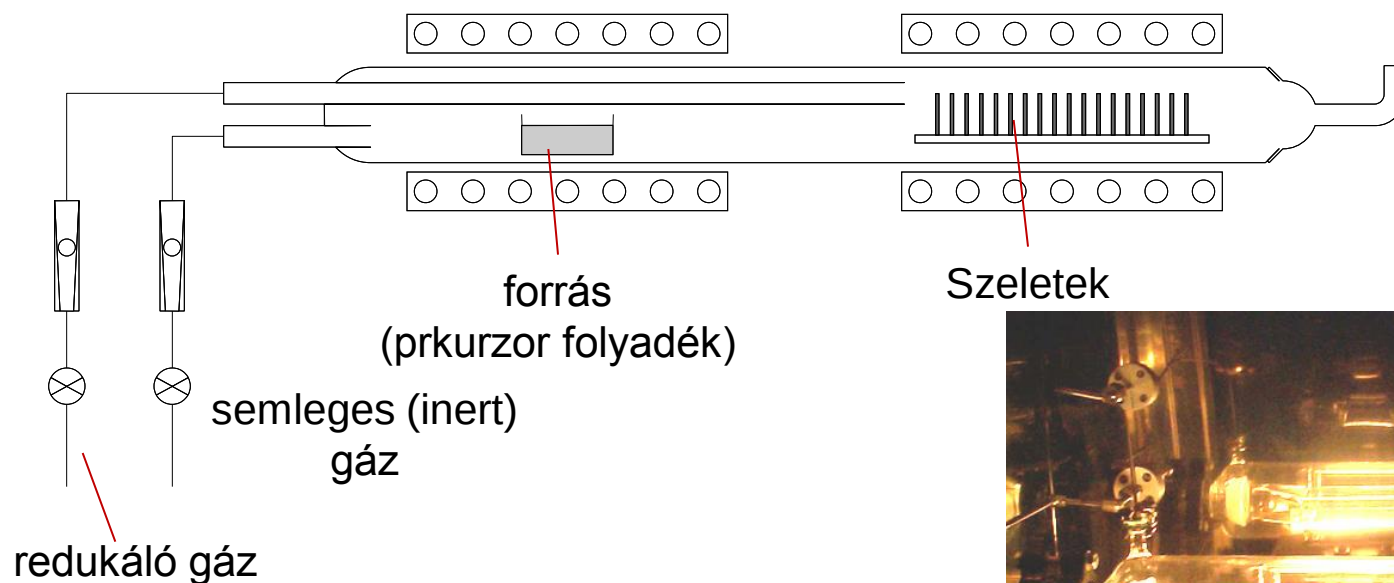
SiH_4 (szilán) – Si leválasztás

PH_3 (foszfin) – N adalékolás (kártevőirtás)

B_2H_4 (diborán) – P adalékolás

A reakciót úgy kell megválasztani, hogy a keletkező melléktermékek ne képezzenek csapadékot és ne támadják meg a szeletet.

A CVD REAKTOR SZERKEZETE



LPCVD: low pressure CVD (alacsony nyomású CVD)

PECVD: plasma enhanced CVD (plazmakisülés közbeni CVD)

CVD-VEL LEVÁLASZTHATÓ ANYAGOK A FÉLVEZETŐ TECHNOLÓGIÁBAN (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)
$$\text{SiCl}_4\text{(g)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{Si (s)} + 4\text{HCl (g)} \quad (800\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C})$$

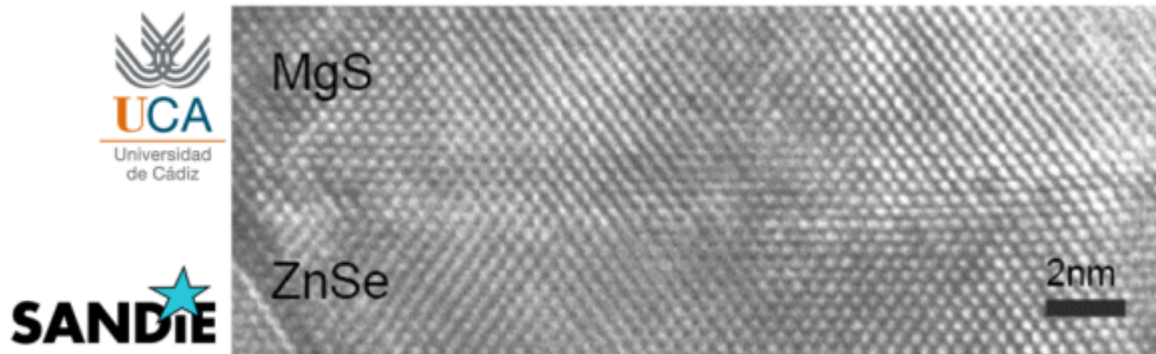
(Megfordítható folyamat, marás is lehetséges. A reakció sebesség függvénye a kristályszerkezet - egykr. v. polikr.)
- SiO_2 (szilícium-oxid) – dielektrikum (tetraetil-ortoszilikát, 600 °C-on)
$$\text{Si(OC}_2\text{H}_5)_4 \text{ (g)} \rightarrow \text{SiO}_2 \text{ (s)} + 2\text{O(C}_2\text{H}_5)_2 \text{ (g)}$$
- Si_3N_4 – szigetelő réteg PECVD-vel (szilán és ammónia keverékből)
$$3 \text{SiH}_4\text{(g)} + 4 \text{NH}_3\text{(g)} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4\text{(s)} + 12 \text{H}_2\text{(g)}$$

CVD – KÉMIAI GŐZFÁZISÚ LEVÁLASZTÁS TÍPUSAI

- APCVD – atmoszférikus nyomású CVD: **(+)** Gyors, egyszerű, nagy kihozatal, **(-)** Kevéssé tiszta eljárás
Alkalmazás: vastag oxidrétegek növesztésére
- LPCVD – alacsony nyomású CVD: **(+)** Lassú, **(-)** Jó minőségű, egyenletes réteg
Alkalmazás: poly-Si, dielektrikum rétegek
- MOCVD – fémorganikus (metal-organic) CVD
(+) Flexibilis, sokféle anyag (félvezető, fém, dielektrikum) esetében alkalmazható, **(-)** Rendkívül mérgező, veszélyes kiinduló anyagok
Alkalmazás: optikai célú III-V félvezetők, bizonyos fémmezések (pl. Mo, Cu)
- PECVD - Plazmával segített (Plasma Enhanced) CVD: **(+)** A plazma jelenléte lehetővé teszi a reakciókat alacsony hőmérsékleten is, emiatt adalékolás után is használható **(-)** A plazma károsíthatja a hordozót, alkalmazás: dielektrikum rétegek

EPITAXIA

- Definíció: egykristályos réteg leválasztása egykristályos hordozóra
- A leválasztás eredménye: a hordozó és a réteg kristályorientációja (közel) megegyezik.
- NEM összetévesztendő a vékonyrétegekkel és a CVD/PVD eljárásokkal! (Bár CVD használható epitaxiás célokra.)



Kristálystruktúra heteroepitaxiával növesztett II-VI félvezetők esetében

EPITAXIA FAJTÁI

Rétegszerkezet szerint:

- A **homoepitaxia**: a felvitt réteg ugyanolyan anyagú, mint a hordozó. Az egykristályos réteg ideális esetben tökéletes, hibahelymentes folytatása a hordozónak. Alkalmazás: eltérő adalékoltságú réteg növesztése a hordozóra (lépcsős adalékoltsági profil)
- A **heteroepitaxia**: olyan epitaxia, ahol a hordozó és a felvitt réteg kémiai összetétele különböző. Lényeges, hogy a rácsállandóban nem lehet nagy különbség. Alkalmazása: vegyületfélvezető rétegrendszerek elsősorban fotonikai célra (kék, UV lézer, lézerciódák, függőleges üregű lézerek), vagy pl. SOS – silicon-on-sapphire: szilícium zafír felületen.

Leválasztási módszer szerint:

- **VPE**: Vapour Phase Epitaxy (Gőz fázisú epitaxia, leginkább CVD)
- **LPE**: Liquid Phase Epitaxy (Folyadék fázisú epitaxia)
- **MBE**: Molecular Beam Epitaxy (Molekulasugaras epitaxia)

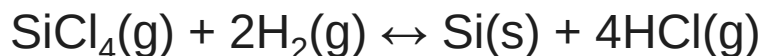
VPE – GŐZFÁZISÚ EPITAXIA

A leválasztandó anyagot gőz fázisba visszük. A VPE eljárás a CVD speciális, egykristályos rétegek növesztésére szolgáló változata.

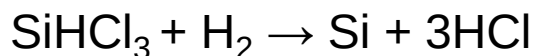
Az epitaxiás növekedés sebessége nagyban függ a gázösszetételtől.

Pl.: Si növesztése VPE-vel

Szilícium-tetrakloridból és hidrogénből, 1200 °C-on (l. CVD):



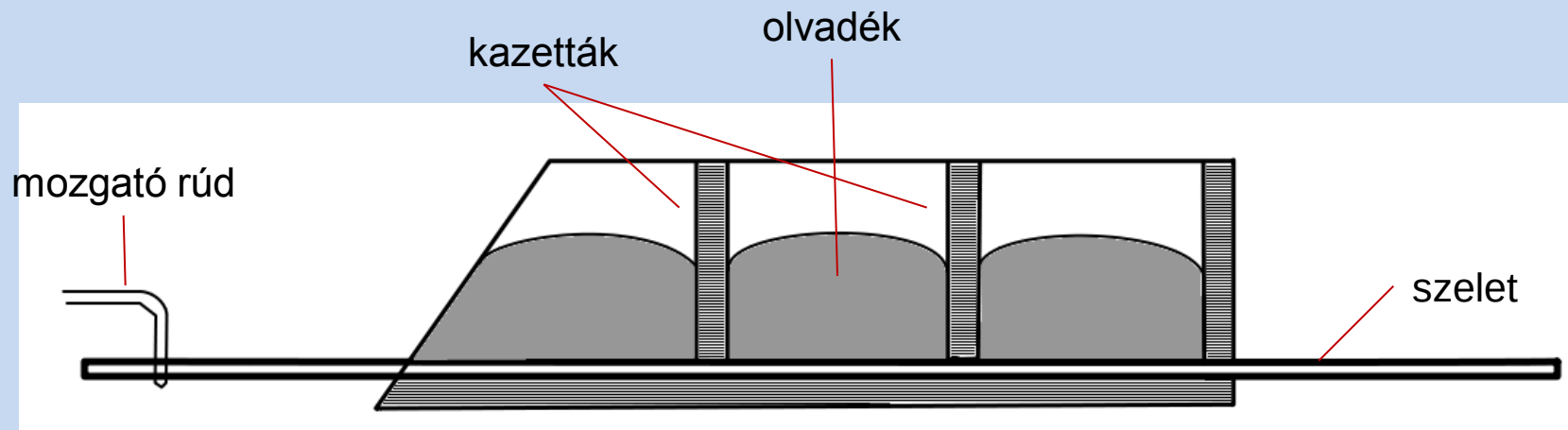
Vagy szilícium triklór-szilánból:



Ebben a reakcióban a szilícium-tetraklorid és a hidrogén mennyiségének a szabályozásával változtatható a növekedési sebesség.

Kb. 2 µm/min növekedési sebesség felett polikristályos, azalatt epitaxiás réteg nő.

LPE – FOLYADÉKFÁZISÚ EPITAXIA



Az olvadék állapotban lévő anyagot grafit kazettákból az alatta elhúzott hordozóra választják le.

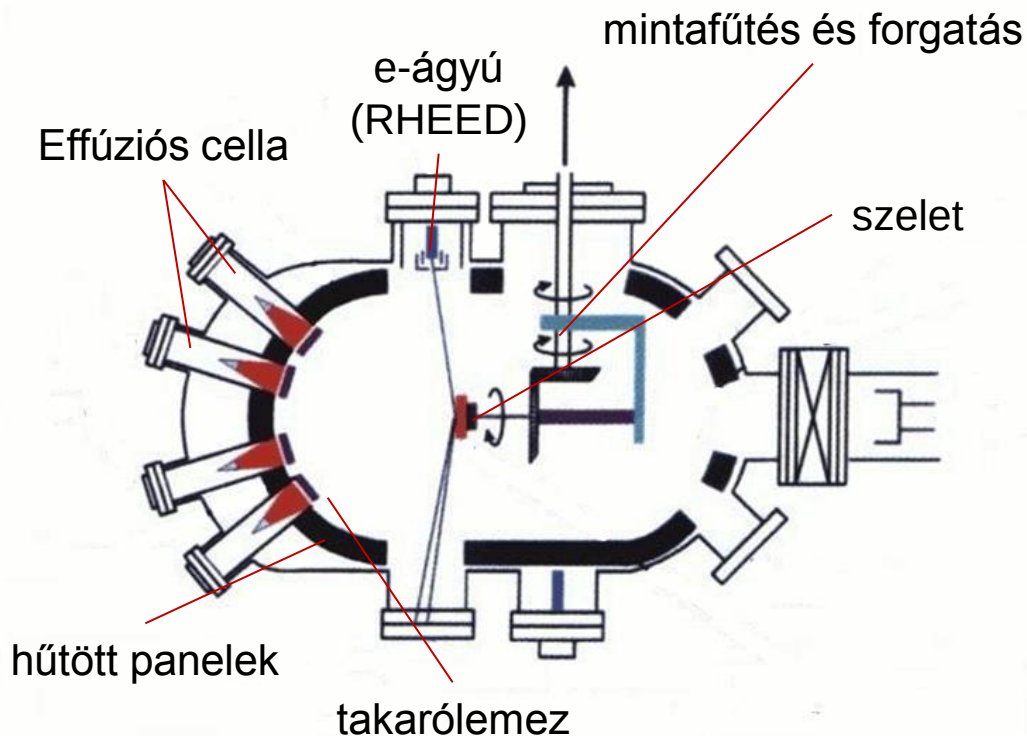
Előnye: gyors, egyszerű eljárás (az MBE-hez képest)

Alkalmazása pl: III-V vegyületfélvezető rétegszerkezetek előállítása

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA

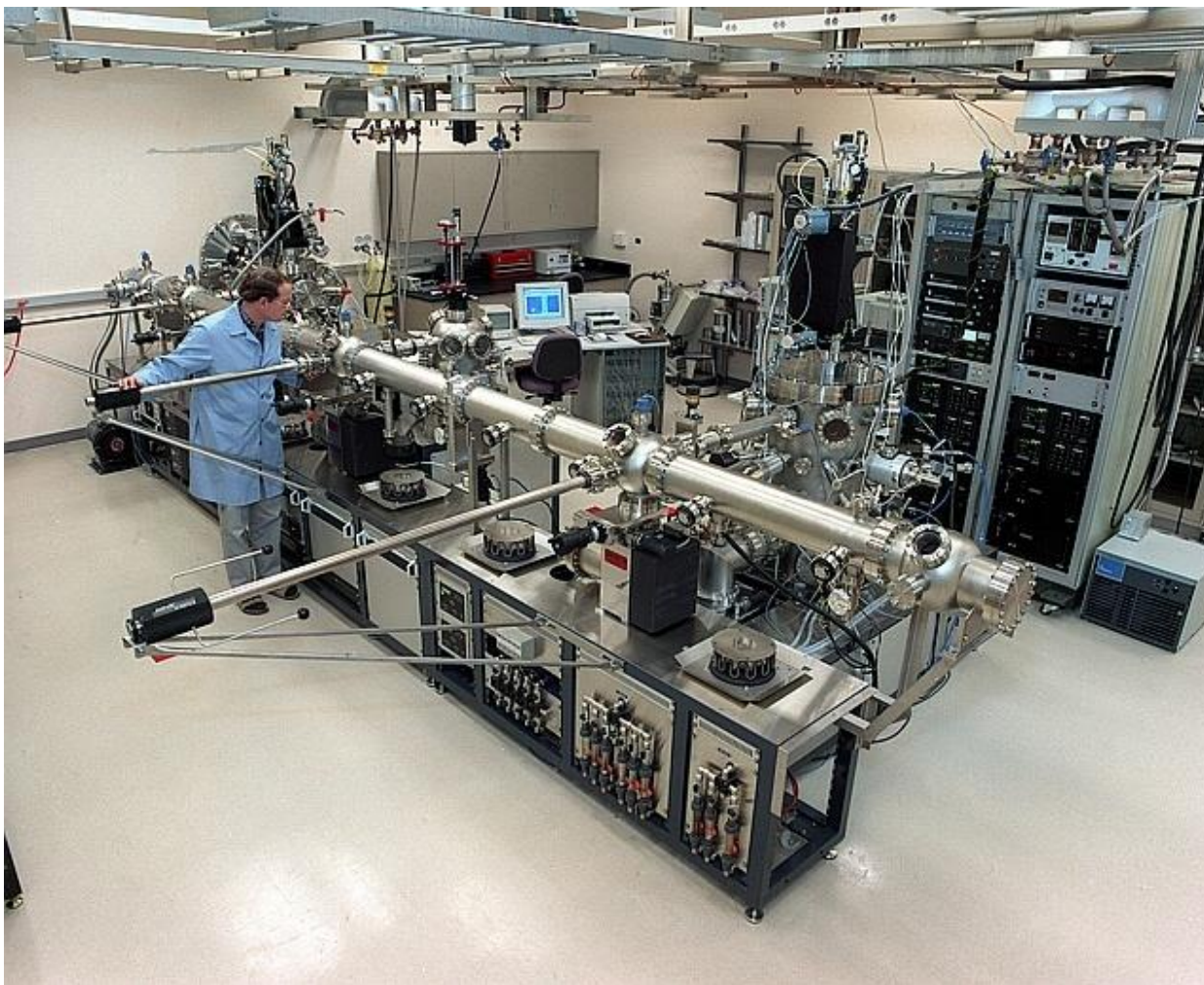
Lassan párolgó vagy szublimáló forrásból irányított sugárban viszünk anyagot a hordozóra.

- Ultranagy vákuum szükséges
- Lassú növekedés mellett jó minőségű réteg nyerhető.
- Alkalmazás: modern lézerdiodák rétegszerkezete, nanoszerkezetek



A effúziós (gőzforrás) cellákat cseppfolyós N_2 -el hűtött panelek veszik körül (szennyezők távoltartása, vákuum javítása). A molekulasugarat takarólemezzel (*shutter*) lehet megszakítani. A réteg kialakulását nagyenergiájú elektrondiffrakcióval (reflexió) követik (RHEED). A szubsztrátot általában néhány száz °C-on tartják.

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA



FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS: OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

A SiO₂ növesztésének célja lehet:

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

Növesztése történhet:

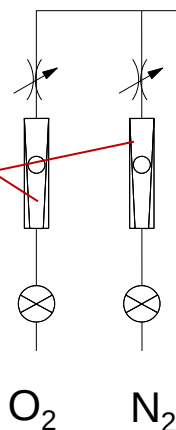
- CVD-vel,
- száraz oxidációval: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
Pl.: 1000 °C-on 7 nm SiO₂ 15 perc alatt nő (kapuelektróda).
- nedves oxidációval: $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$
Pl.: 10x gyorsabb a száraz oxidációnál. 1000 °C-on 700nm SiO₂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

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS: OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

Száraz oxidáció:

áramlásmérő



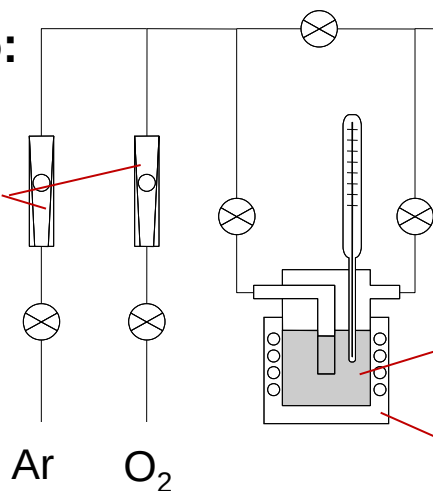
szeletek

fűtés

elszívás

Nedves oxidáció:

áramlásmérő



2x desztillált víz

hőmérséklet-
stabilizált fűtés

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS: OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

szilán + oxigén, TEOS (tetraetil-ortoszilikát), diklór-szilán + dinitrogén-oxid

	PECVD	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2$ (CVD)	$\text{Si}(\text{OEt})_4$ (CVD)	$\text{SiCl}_2\text{H}_2 + \text{N}_2\text{O}$ (CVD)	Termikus oxidáció
Hőmérséklet (°C)	200	450	700	900	1000
Összetétel	$\text{SiO}_{1.9}(\text{H})$	$\text{SiO}_2(\text{H})$	SiO_2	$\text{SiO}_2(\text{Cl})$	SiO_2
Fedés	Nem alakkövető	Nem alakkövető	Alakkövető	Alakkövető	Alakkövető
Termikus stabilitás	H-t veszít	tömörödik	stabil	Cl-t veszít	Stabil
Törésmutató	1.47	1.44	1.46	1.46	1.46
Dielektromos állandó	4.9	4.3	4.0	4.0	3.9

AZ ADALÉKOLTSÁG MEGVÁLTOZTATÁSA

Az adalékok koncentrációját utólag (=nem növesztés közben, mint a homoepitaxiánál) is megváltoztathatjuk.

Két alapvető módszer létezik az adalékolásra:

- **Diffúzió:** az adalék vagy szilárd (vékonyréteg) formában, vagy gázként áll rendelkezésre, és diffúzióval hatol be a hordozóba
- **Implantáció:** megfelelő energiára gyorsított ionokkal bombázzuk a hordozót.

Az adalékkoncentráció itt számítással/modellezéssel meghatározható függvényt követ, amely nem lesz „ideális” (lépcsős).

A DIFFÚZIÓ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

Diffúzió: anyagtranszport koncentrációkülönbség hatására.

Folytonos koncentráció esetében a Fick-törvények írják le a koncentráció hely- és időfüggését.

$$\underline{j} = -D \cdot \text{grad } c = -D \nabla c$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla (D \nabla c) \xrightarrow{1D} \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

c : koncentráció [mol/m³]

D : diffúziós állandó [m²/s]

$\underline{j}$: részecskeáram-sűrűség (fluxus) [mol/(m²s)]

A DIFFÚZIÓ FÜGGÉSE A HŐMÉRSÉKLETTŐL

A D diffúziós együttható csak a hőmérséklettől függ:

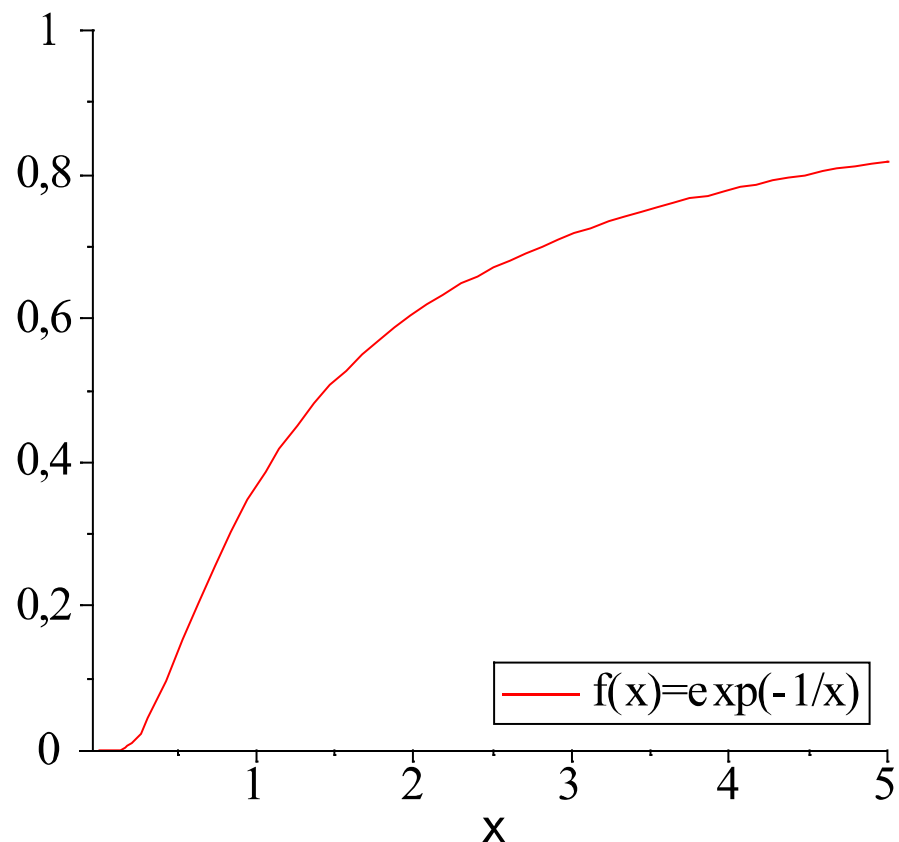
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{H}{kT}\right)$$

H : aktivációs energia [J]

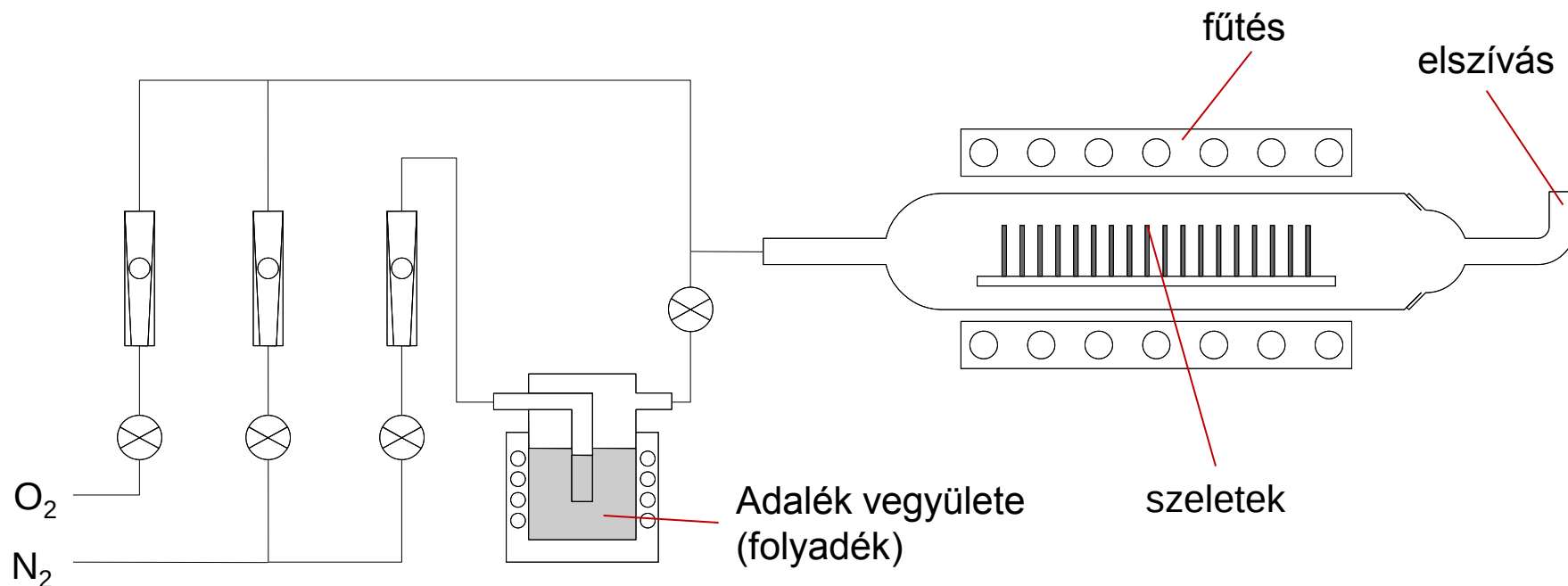
k : Boltzmann-állandó
 $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]

A függvény a végtelenben D_0 -hoz konvergál. Az x a H/k -ra normált hőmérséklet.

(az ábrán $D_0=1$)



A DIFFÚZIÓS KÁLYHA VÁZLATA



A hőmérséklet értékét $\pm 0,5$ °C pontossággal kell stabilizálni 1150-1350 °C-on!

A DIFFÚZIÓ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

Diffúziós mélységi profilt (x koordináta mentén) meghatározzuk két speciális esetben:

- felületi koncentráció állandó, akkor

$$c(x) = c_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

emlékeztető: $\operatorname{erfc} z = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$

- Adott mennyiségű anyag (pl.: vékonyréteg a felületen) , akkor

$$c(x) = \frac{n}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

Diffusion

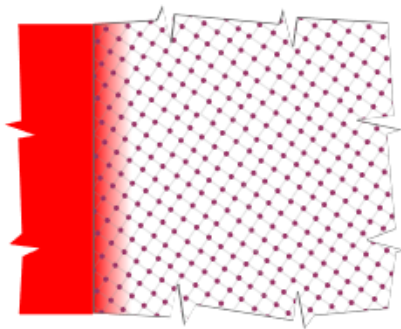
Diffusion: dopant species are present in a solid (thin film) or gaseous form and introduced into the substrate by diffusion.

According Fick II. $\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2}$ where D is the temperature-dependent diffusion constant: $D = D_0 e^{-\frac{H}{kT}}$

Diffusion profiles (along the x axis) are calculated here in two special cases:

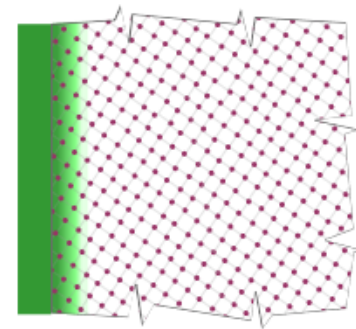
constant surface concentration

$$C = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$



constant amount of material

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$



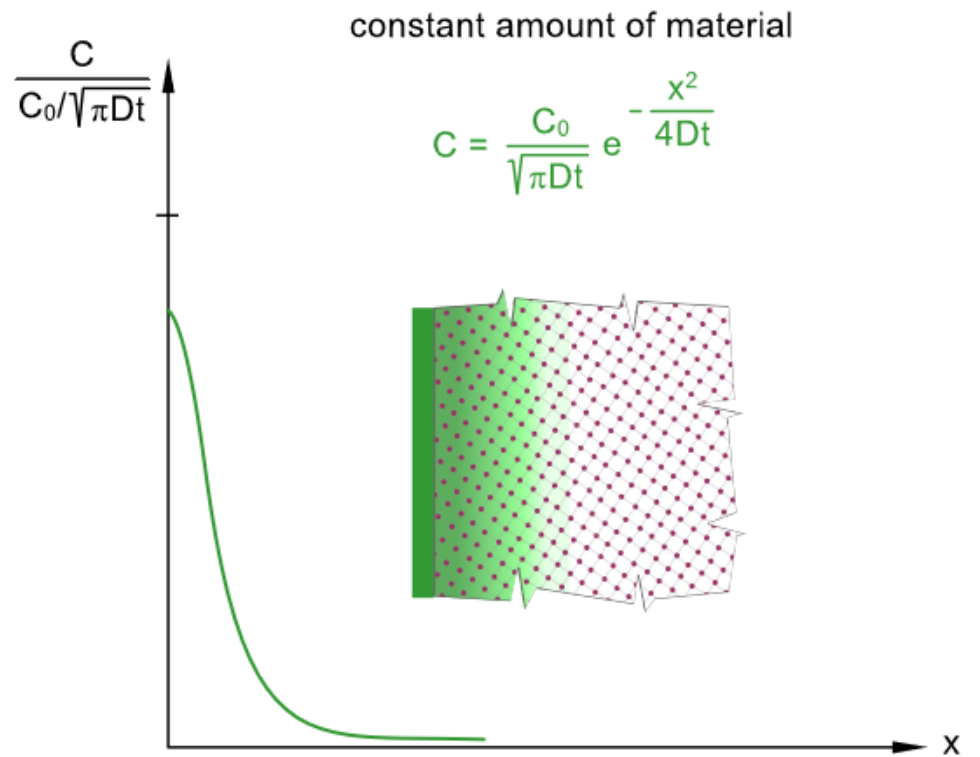
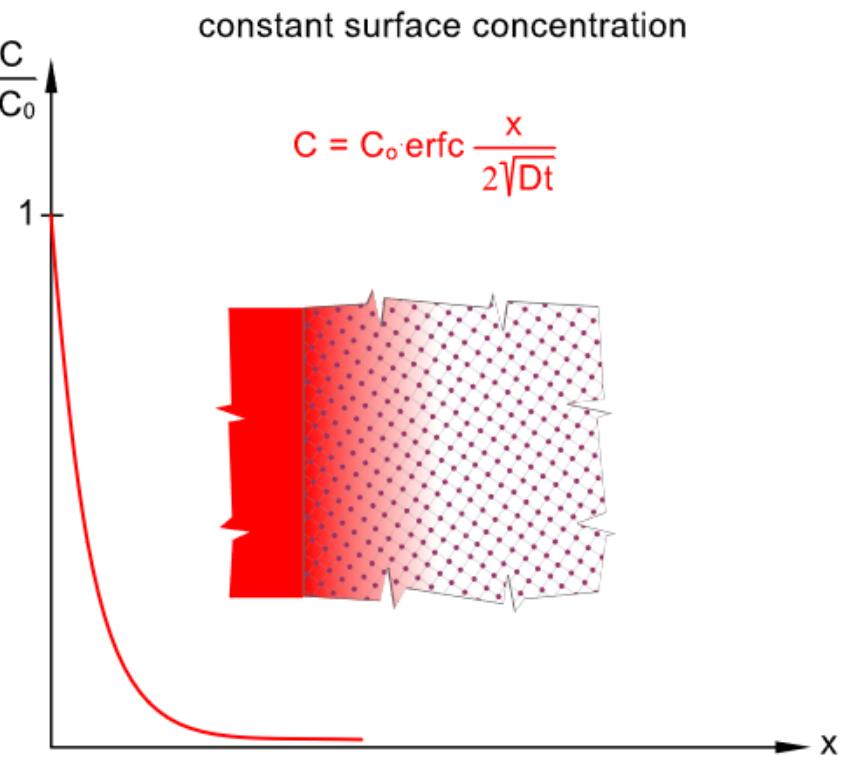
t = T1

Diffusion

Diffusion: dopant species are present in a solid (thin film) or gaseous form and introduced into the substrate by diffusion.

According Fick II. $\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2}$ where D is the temperature-dependent diffusion constant: $D = D_0 e^{-\frac{H}{kT}}$

Diffusion profiles (along the x axis) are calculated here in two special cases:



t= T2>T1

Diffusion

Diffusion: dopant species are present in a solid (thin film) or gaseous form and introduced into the substrate by diffusion.

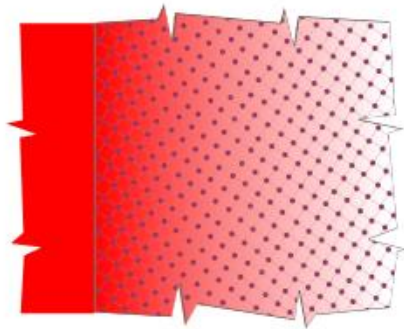
According Fick II. $\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2}$ where D is the temperature-dependent diffusion constant: $D = D_0 e^{-\frac{H}{kT}}$

Diffusion profiles (along the x axis) are calculated here in two special cases:

[Reset](#)

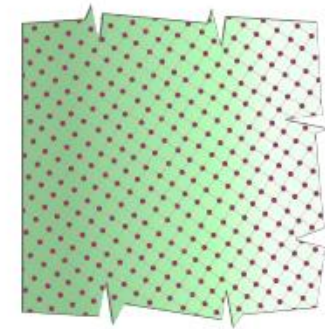
constant surface concentration

$$C = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$



constant amount of material

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$



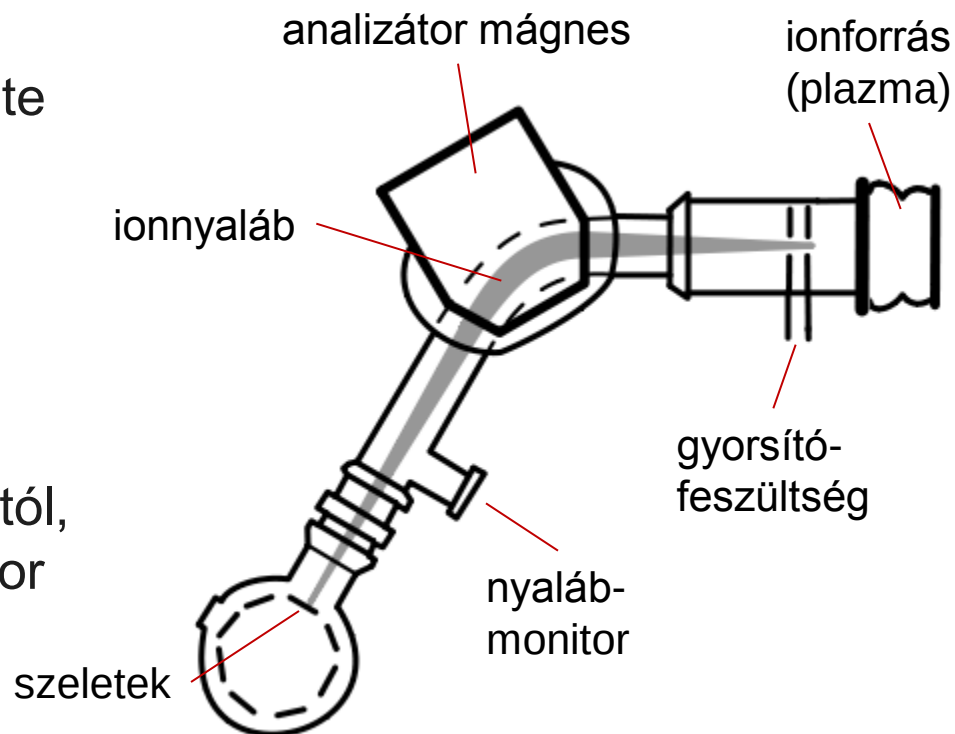
t= T3>T2>T1

AZ (ION)IMPLANTÁCIÓ

Az ionimplantáció során az adalék ionját elektromos térerővel (20-300kV) felgyorsítva mágneses tömegszeperatoron át a szelet felületébe lövik. A szelet hőmérséklete alacsony maradhat ($<300^{\circ}\text{C}$).

A roncsolt egykristály szerkezete lézer-pásztázás hőkezeléssel visszaállítható.

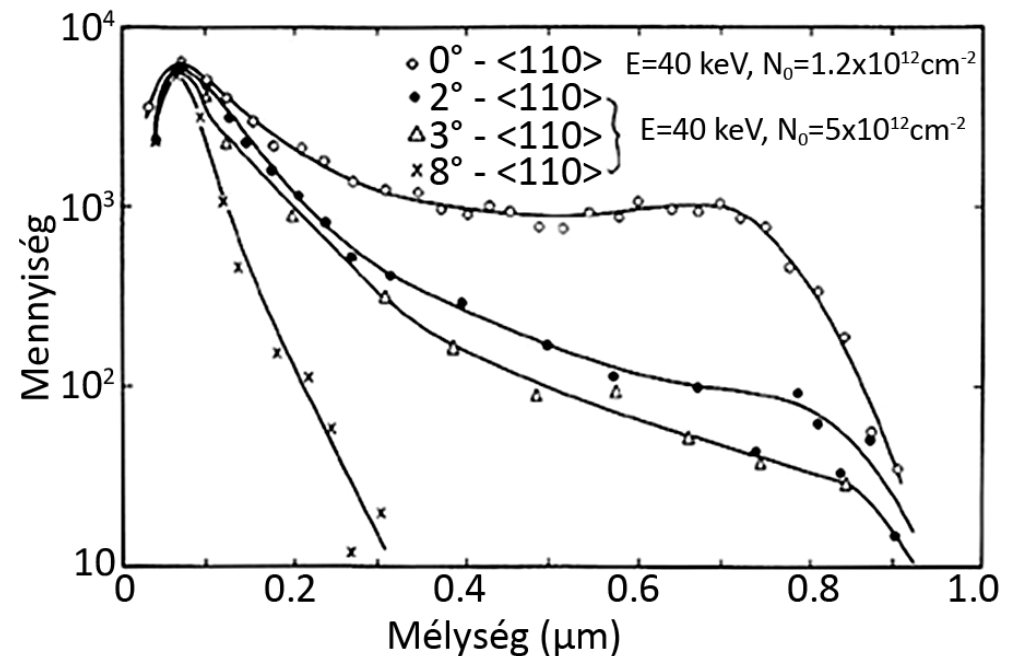
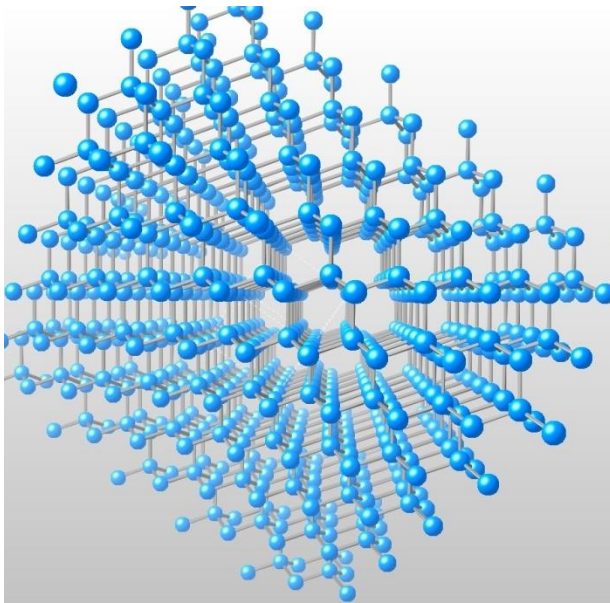
A behatolási mélység és a kialakuló adalékoltsági profil erősen függ az ionok energiájától, ezért szükség van egy analizátor mágnesre, ami kiválasztja a kívánt energiájú ionokat.



(ION)IMPLANTÁCIÓ – A CSATORNAHATÁS

A csatornahatás akkor alakul ki, ha az ionáram iránya egybeesik a kristály valamelyik alacsony Miller-indexű orientációjával. Ekkor az ionok mozgásának irányában „csatornák” alakulnak ki, ahol az ionok kisebb valószínűséggel ütköznek.

Az implantáció során kerülendő, ezért a kristályt tilos pontosan orientálni!

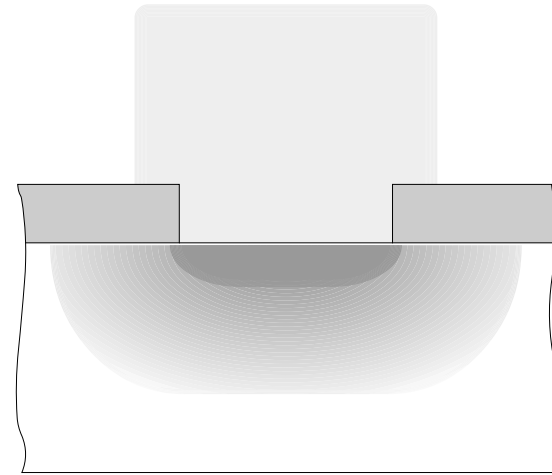


Az implantáció folyamata során keletkezett kristályhibákat utólagos hőkezeléssel lehet javítani

A DIFFÚZIÓ ÉS AZ IMPLANTÁCIÓ KONCENTRÁCIÓ-PROFILJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Diffúzió esetében:

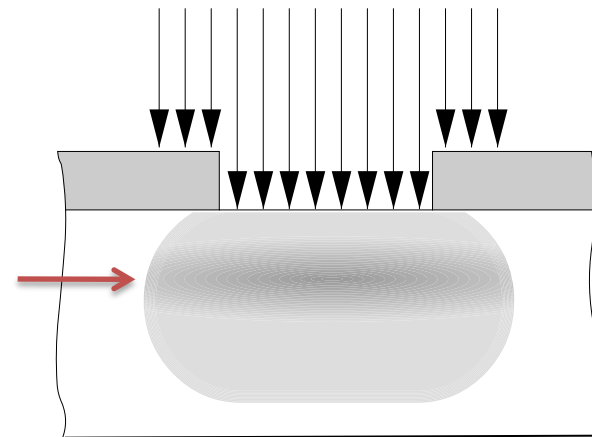
A legnagyobb koncentráció a felületen alakul ki.



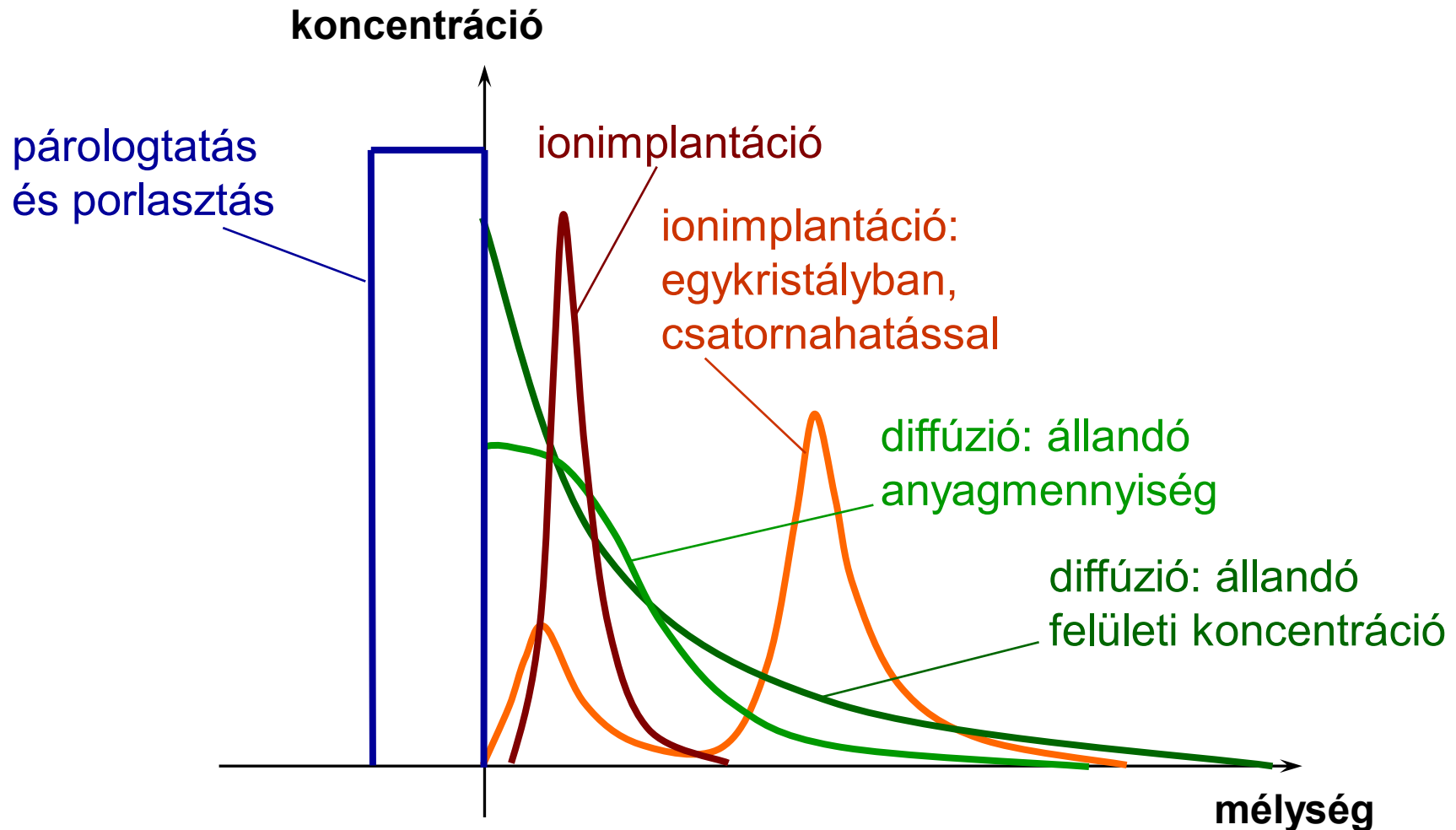
Az implantáció esetében:

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.



A DIFFÚZIÓ ÉS AZ IMPLANTÁCIÓ KONCENTRÁCIÓ-PROFILJÁNAK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA



Példa kérdések

1. A diffúziós állandó ...

- A ... egy természeti állandó (H)
- B ... nagysága a hőmérséklettől fordítottan arányosan függ (H).
- C ... nagysága a hőmérséklettől exponenciálisan függ (I).
- D ... Lehet negatív előjelű (H)

2. Az korszerű litográfiás eljárások nagy rajzolatfinomság esetén ...

- A ... gamma sugarak használ (H)
- B ... kék színű fényt használ (H)
- C ... Infravörös sugarakat használ (H)
- D ... UV sugarakat használ (I)

3. A fotroeizisztre általában jellemző, hogy

- A ... spin-coating technológiával viszik fel (I)
- B ... a felvitt réteg vastagsága 1-5 mm (H)
- C ... csak azokra a helyekre választják le, ahol maszkolnia kell (H)
- D ... fő összetevője üvegszármazék (H)