

Adalékolás

A félvezetők tömbi adalékolása történhet

- növesztés közben (kristályhúzás, epitaxia),
- neutron-transzmutációval,

lokális adalékolása

- diffúzióval,
- ionimplantációval.

Neutron-transzmutáció

A neutron-transzmutációs adalékolásnál (*neutron transmutation doping*, NTD) a félvezető anyagot termikus neutronokkal sugározzák be. A kristálysí atomjai befoghatják a kisenergiájú neutronokat, melynek során egy gerjesztett izotóp keletkezik, mely β - és γ -sugárzással radioaktívan elbomlik, és egy idegen atomot hagy a rácshelyen. Az ezen folyamat során keletkező atom rendszáma eggyel nagyobb, mint a kiindulási atomé. A IV. oszlopbeli, elemi félvezetőknél tehát V. oszlopbeli atom keletkezik, amely tudvalevőleg donor.

A módszert széles körben alkalmazzák a szilícium-technológiában.



Az alkalmazott neutronbesugárzás hatására a 3,1%-os arányban jelenlévő ^{30}Si -ből ^{31}P , azaz donor képződik. A tömbanyagban igen pontos, hosszirányban és sugárirányban homogén ($\sim 1\%$ vagy jobb) adalékolást lehet elérni.

A módszer hátránya, hogy drága.

Diffúzió

A diffúzió megkerülhetetlen jelenség a félvezető technológiában

Szándékos – adalékolási célból.

Spontán - magas hőmérsékletű technológiai lépéseknél.

A diffúzió hajtóereje a koncentráció gradiens: kiegyenlítődési folyamat, a nagyobb koncentrációjú hely felől a kisebb irányába.

Monolit technológiai alkalmazásában rendszerint két lépésben történik: elődiffúzió és behajtás.

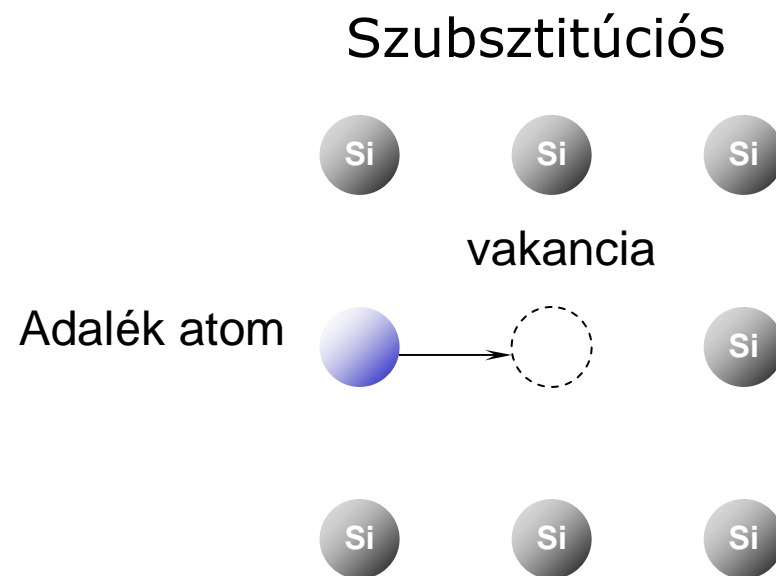
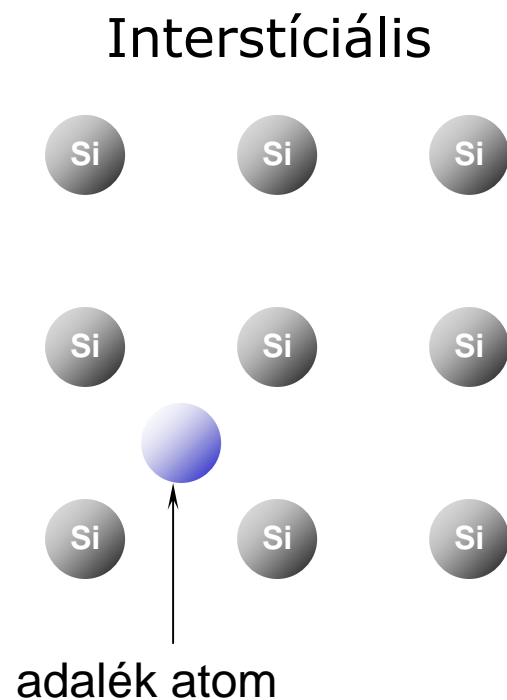
Jellemzői:

- magas hőmérsékletű folyamat,
- adalékbevitel termikus energiával, hajtóerő: koncentráció gradiens,
- párhuzamosan kialakítható oxidréteg,
- profil: exponenciális függvények, felületi maximum.

Diffúziós mechanizmusok

Diffúzió esetén az atomok véletlenszerű (Brown) mozgással haladnak. Az adalékanyag mozgása Si-ban két mechanizmussal történhet: rácsközi (intersticiális) és rácsponti (szubsztitúciós) módon.

Szubsztitúciós diffúzió vakanciák megléte esetén mehet végbe.



Diffúziós mechanizmusok

Si-ban valamennyi adalékatom (P, As, Sb, B, stb.) szubsztitúciós mechanizmussal diffundál.

Au és egyes fém atomok jellemzően intersticiális mechanizmussal diffundálnak (igen gyors diffúzió!)

Vannak olyan diffúziós mechanizmusok is, melyek folyamán szubsztitúciós adalékok mind a vakanciákat, mind az intersticiákat kihasználják

A fluxus arányos a koncentráció kordináta szerinti deriváltjával (Fick I. egyenlete):

$$\Phi = D \, dN_D / dx$$

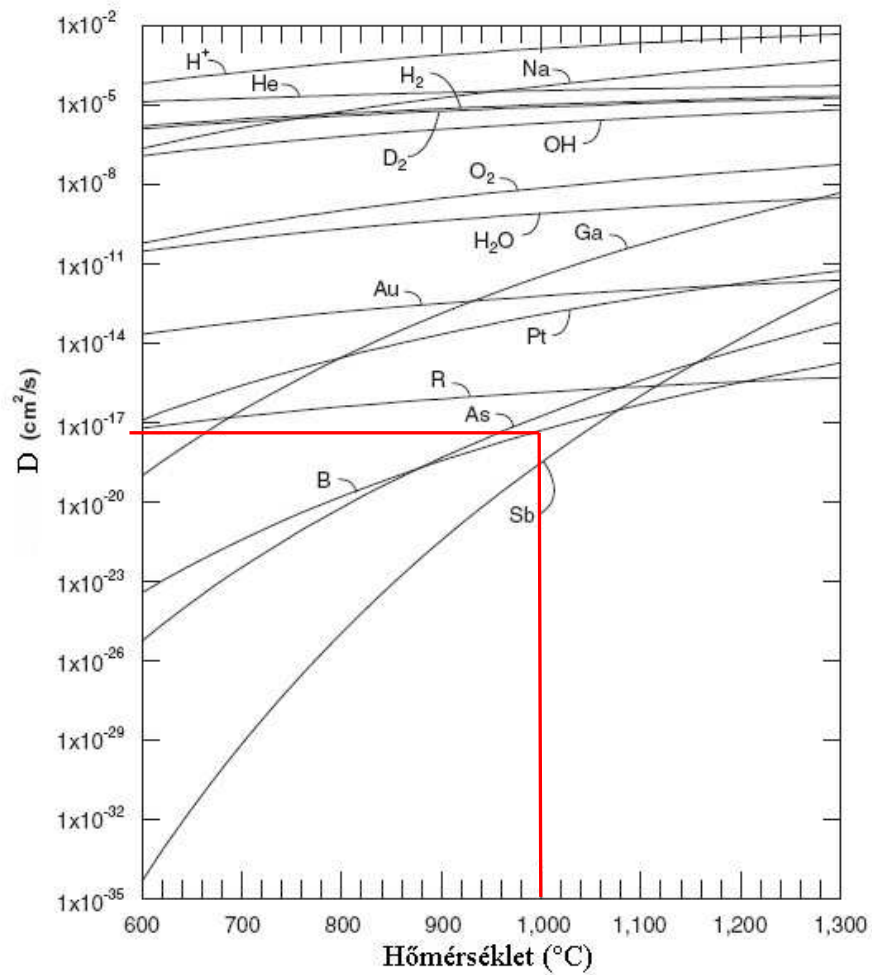
ahol Φ a fluxus, D a diffúziós állandó. Három dimenzióban az anyagáramlás a koncentráció gradiens irányába történik.

A diffúziós állandó (és így a diffúzió) exponenciálisan függ a hőmérséklettől:

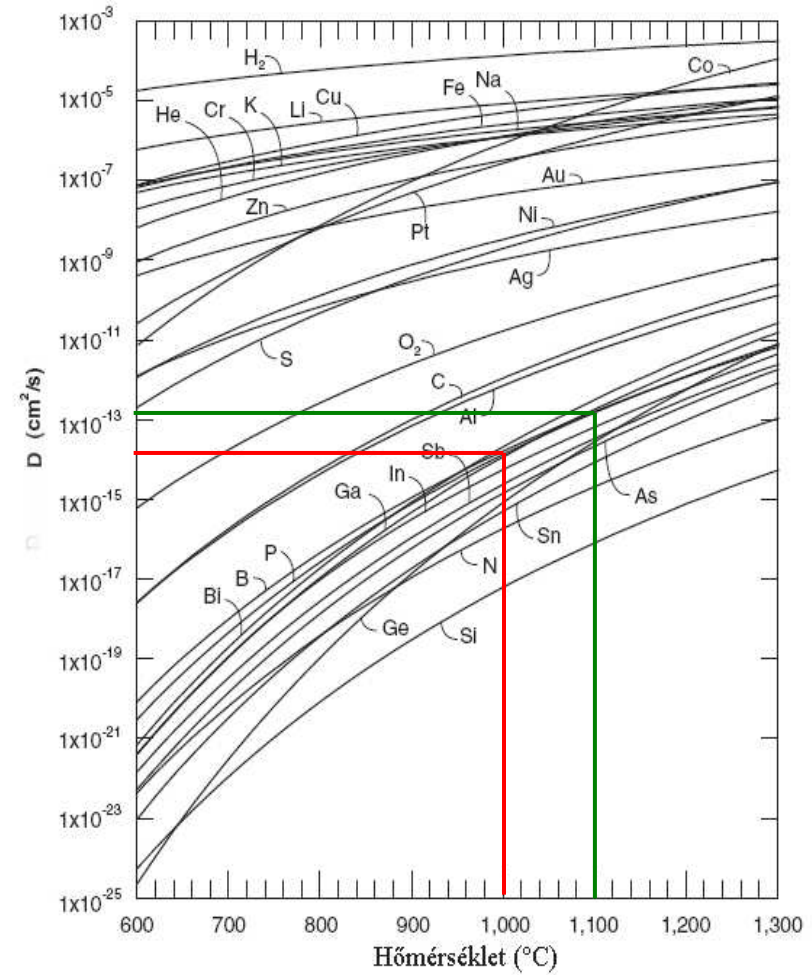
$$D = D_0 \exp(-E_A / kT)$$

ahol E_A az aktivációs energia.

A diffúziós állandó hőmérsékletfüggése



SiO₂-ban



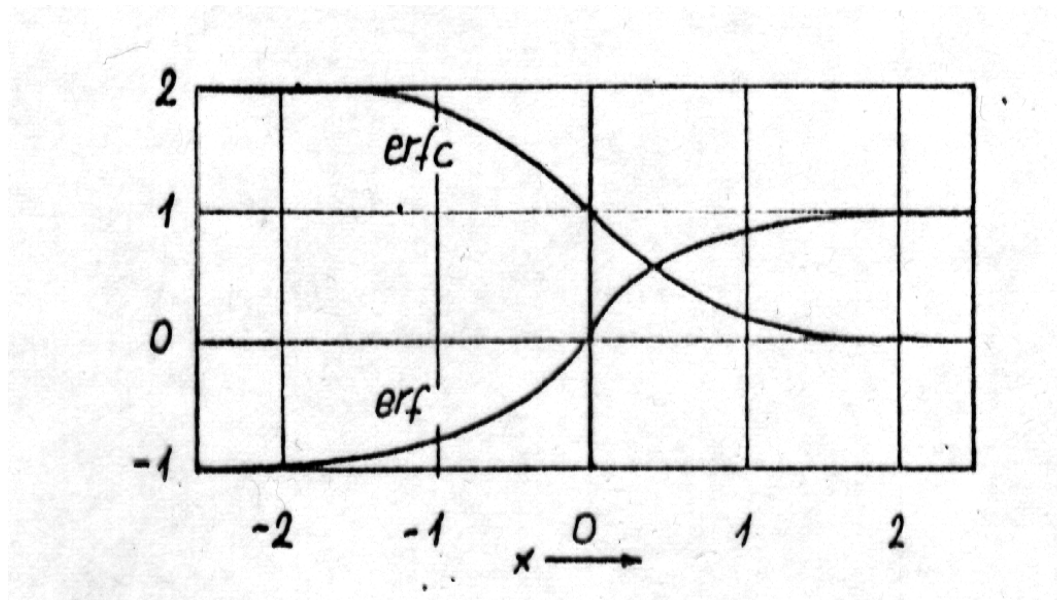
Si-ban

Diffúzió állandó felületi koncentráció mellett

Az adalék mélységbeli eloszlása a kiegészítő hibafüggvénnyel (erfc) írható le. A maximális koncentráció a felületen van.

$$N(x,t) = N_0 \cdot \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-y^2} dy \right] = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

$2\sqrt{Dt}$ = karakterisztikus távolság



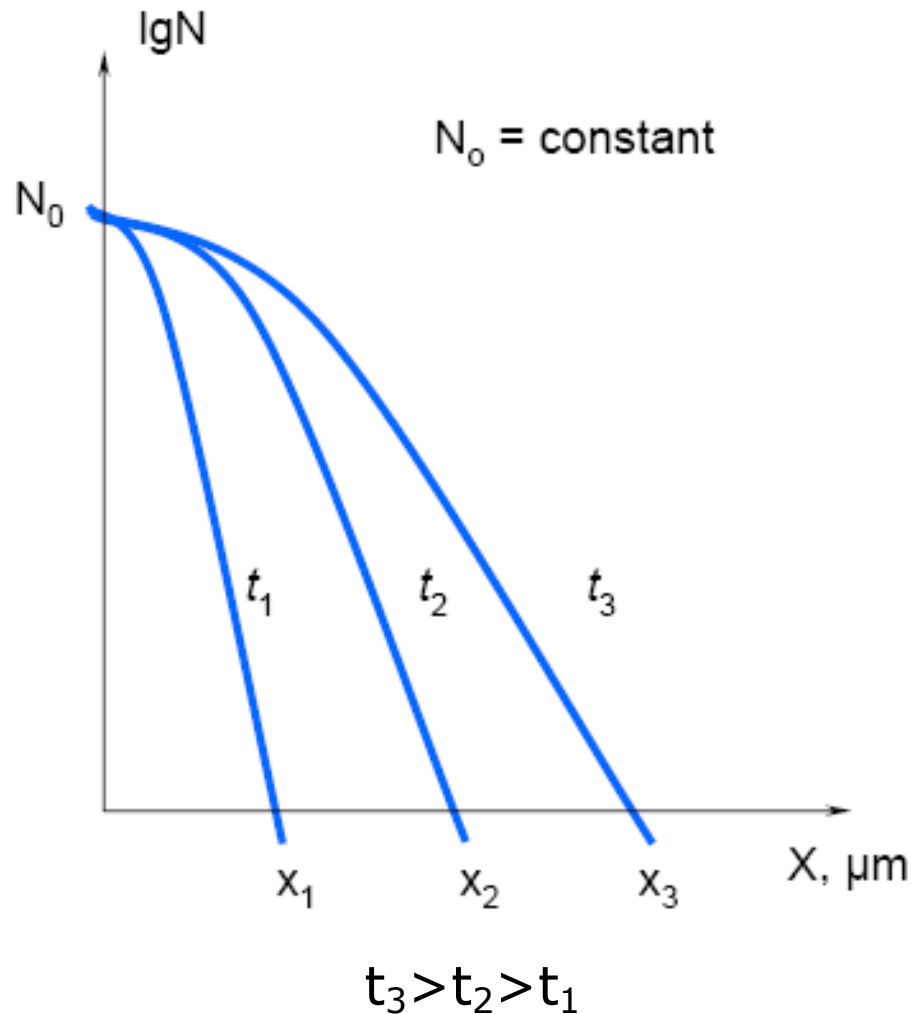
Feltételezés:
D nem függ a
helytől és a
koncentrációtól.

Diffúzió állandó felületi koncentráció mellett

A bevitt
anyagmennyiség:

$$Q(t) = \int_0^{\infty} N(x, t) dx$$

$$Q(t) = 2\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} N_0$$

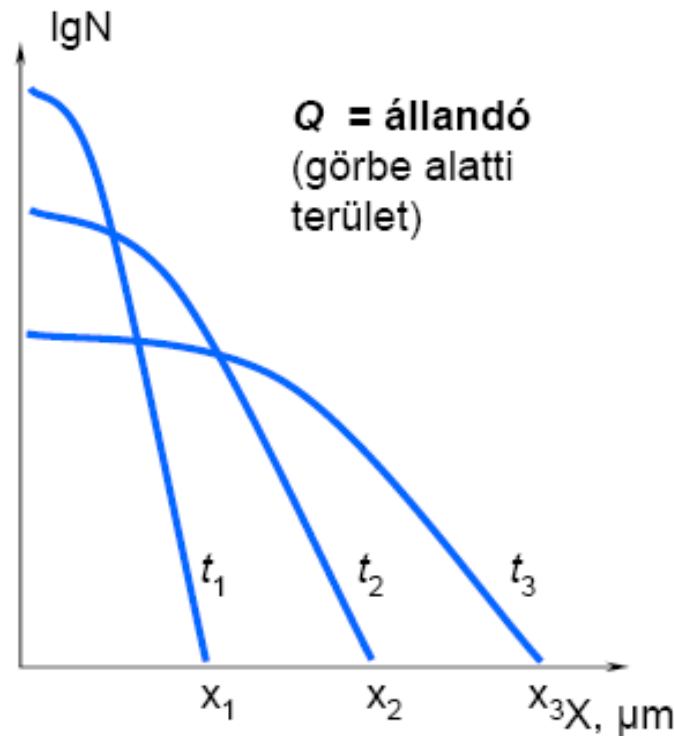


Állandó anyagmennyiségű diffúzió

Az adalék mélységbeli eloszlása normál (Gauss) eloszlással írható le. A maximális koncentráció a felületen van.

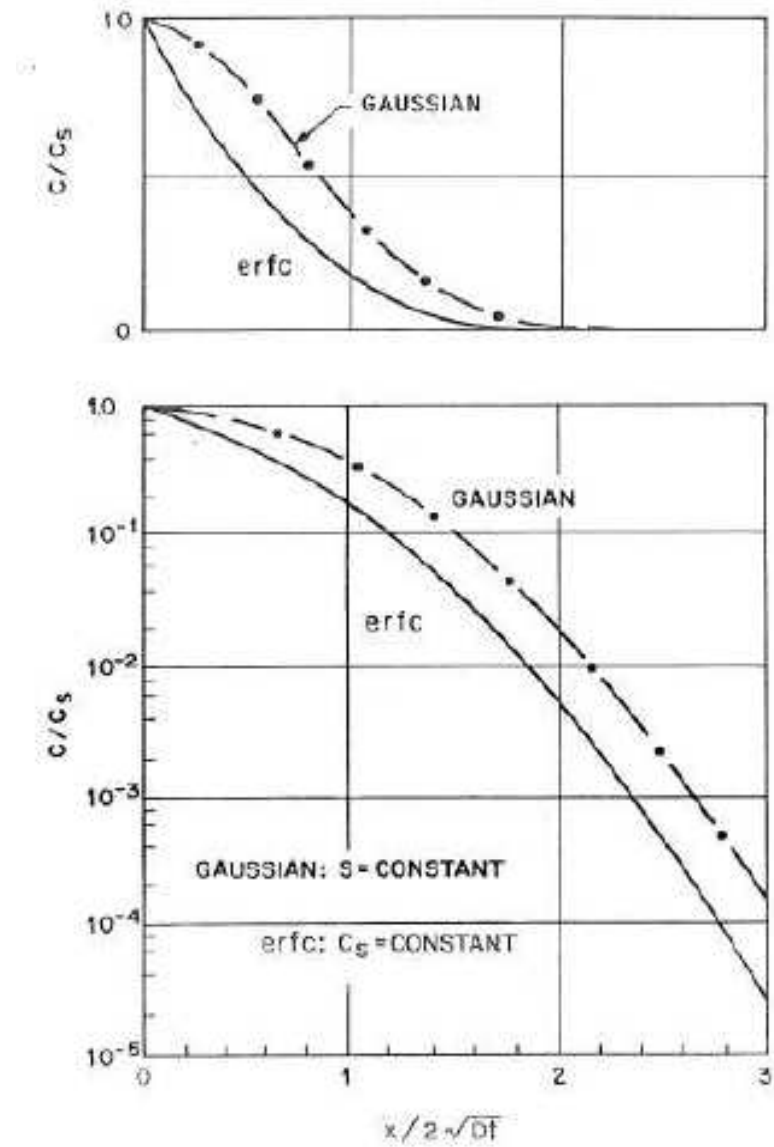
$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Feltételezés:
D nem függ a helytől és a koncentrációtól.



$$t_3 > t_2 > t_1$$

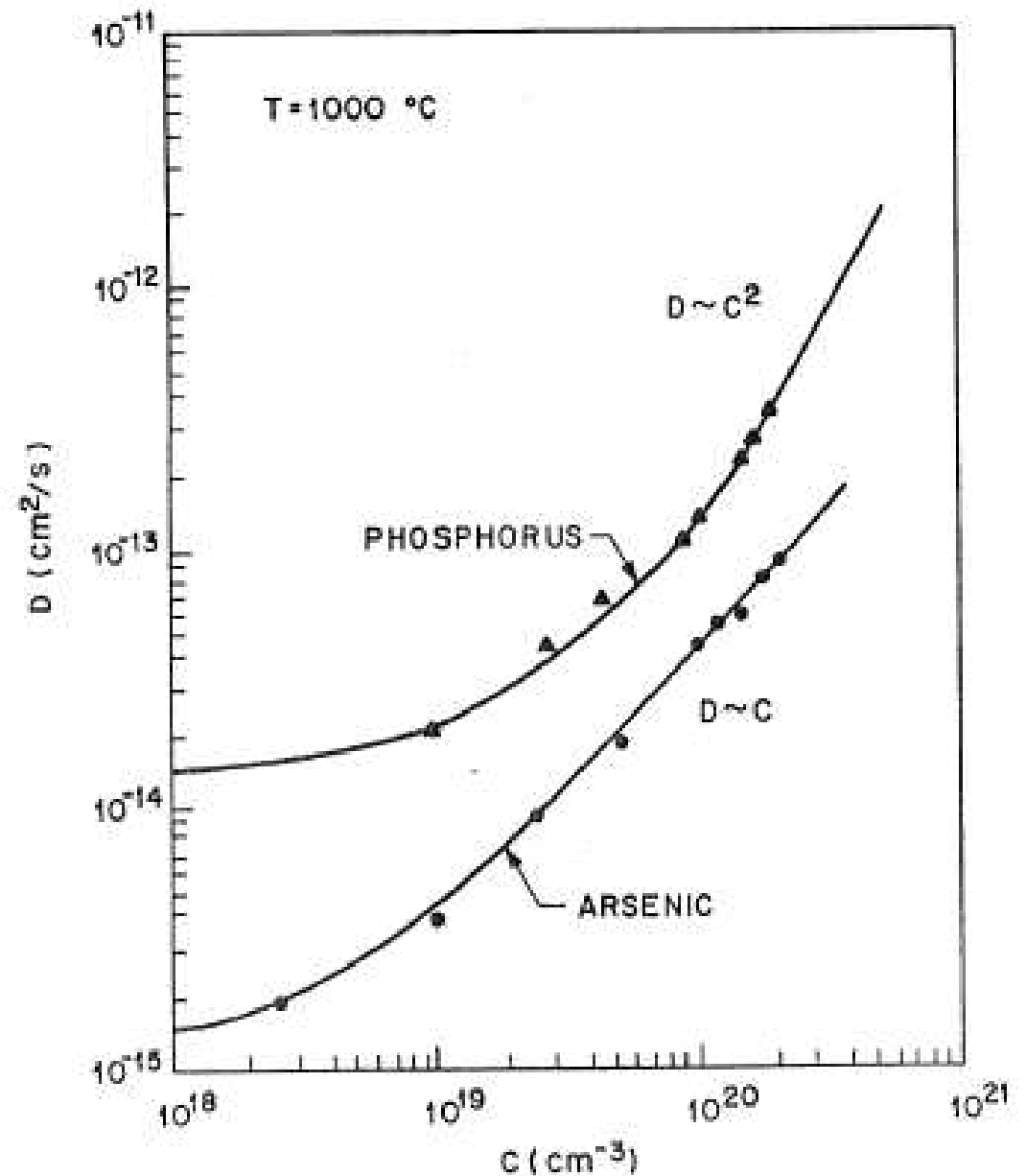
A két eloszlás összehasonlítása



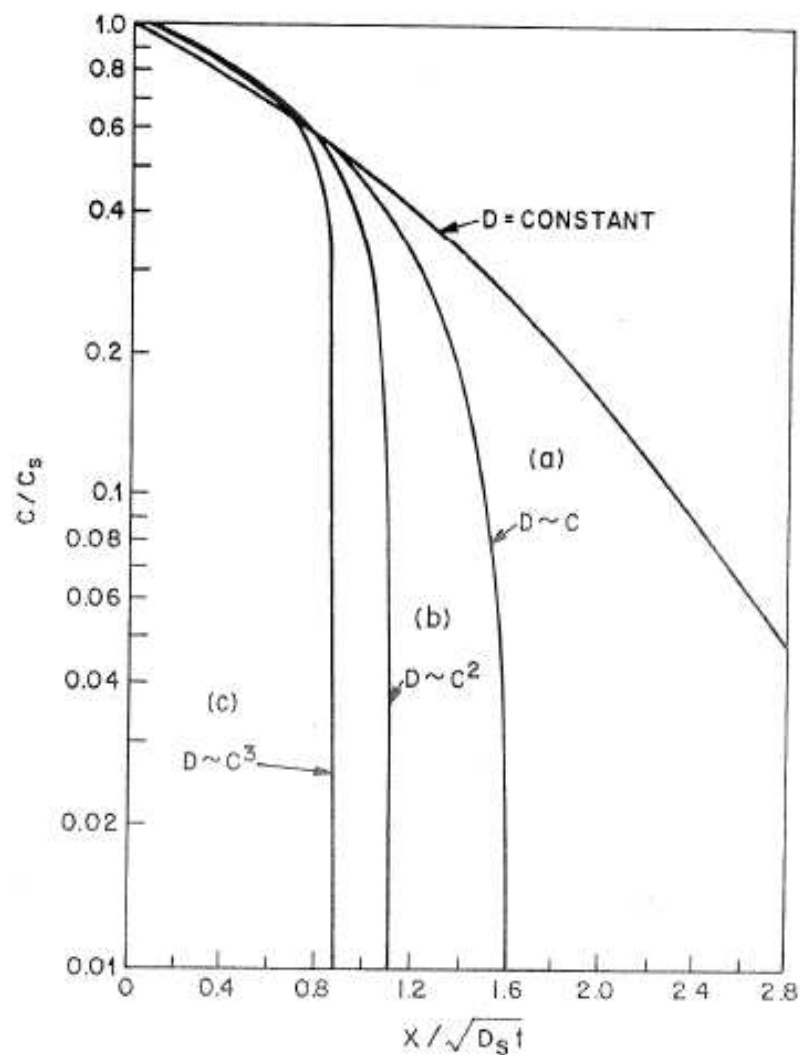
Valós diffúziós állandó

Koncentráció függő,
defekt függő

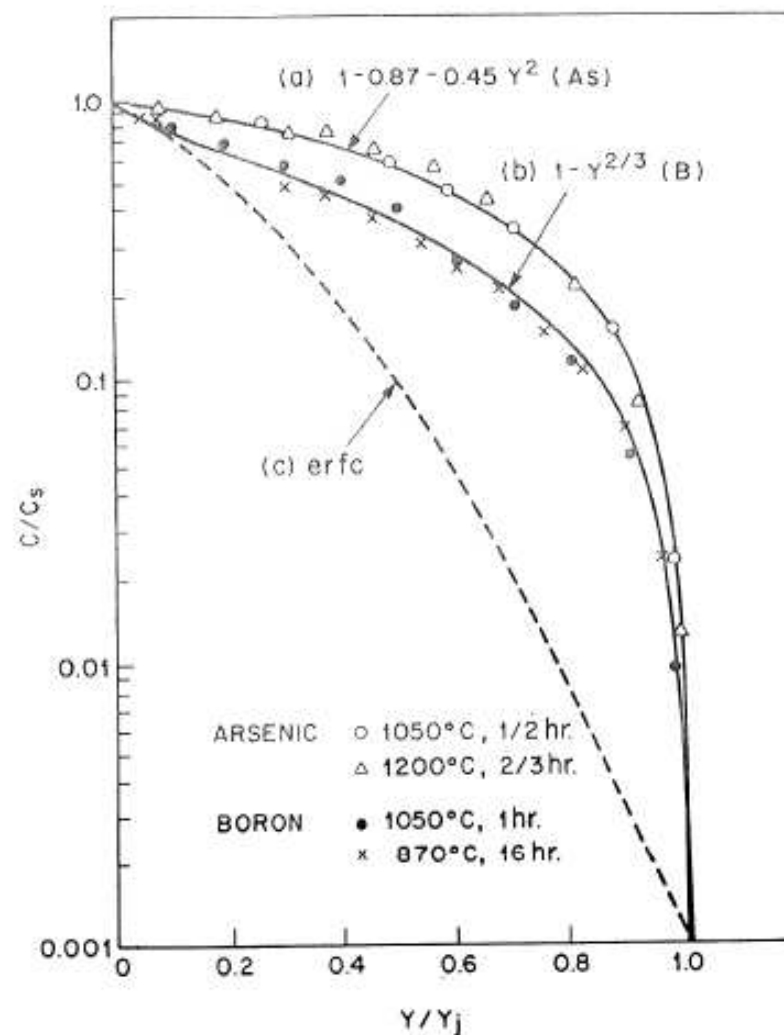
P és As diffúziós állandója Si-ban a
P ill. As koncentráció függvényében



Nagy koncentrációjú diffúziós profilok



$(D_s t)^{1/2}$ karakterisztikus hosszra normálva



Az átmenet mélységére normálva

Adalékolás diffúzióval

Kétlépéses diffúzió

1. Elődifúzió

Adalékolt réteg kialakítása a felületen.

Állandó felületi koncentráció biztosítása:

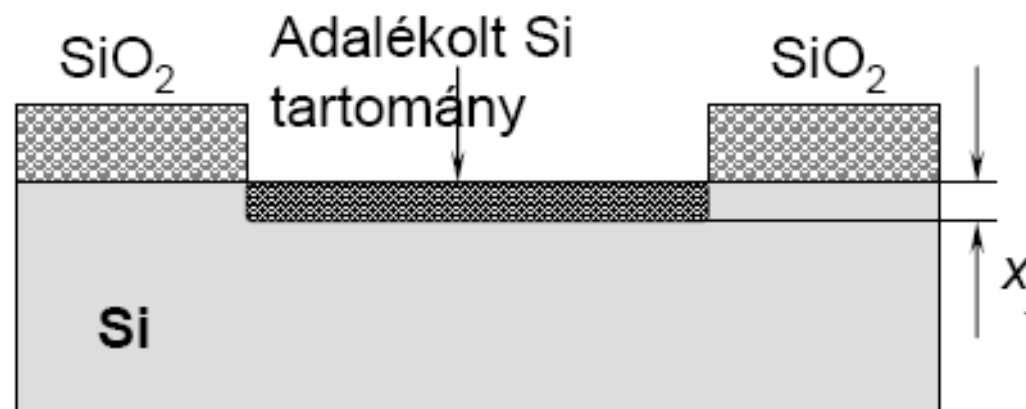
Si-ban 900-1100°C közötti hőmérsékleten, állandó diffúziós forrásból

Tipikus időtartama 30-60 perc

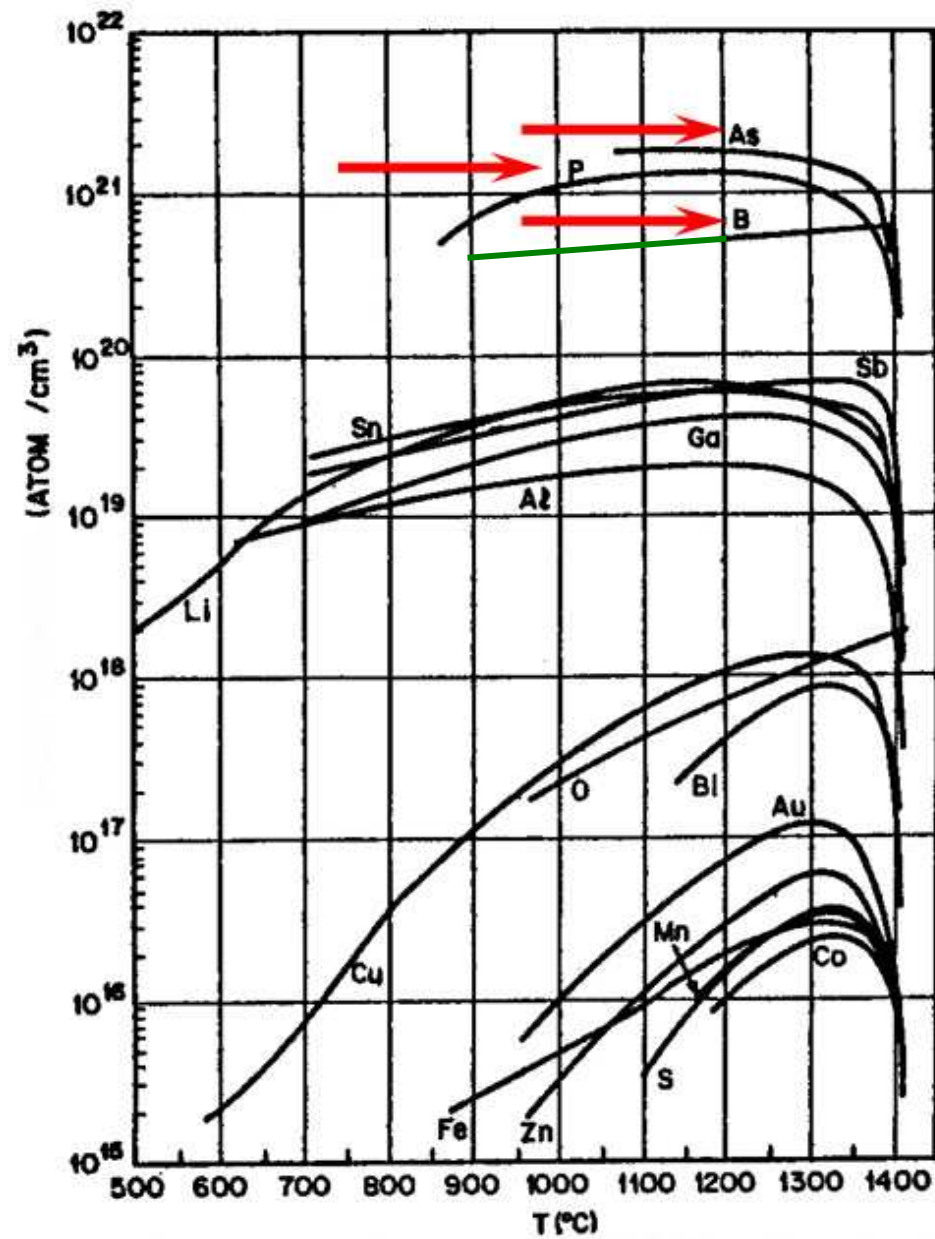
A forrás lehet szilárd, folyadék vagy gáz halmazállapotú.

$x_j \leq 0.5$ (többnyire tized) μm

A koncentrációt az oldékonyság korlátozza.



Szilárd oldékonyság szilíciumban



2. Behajtás

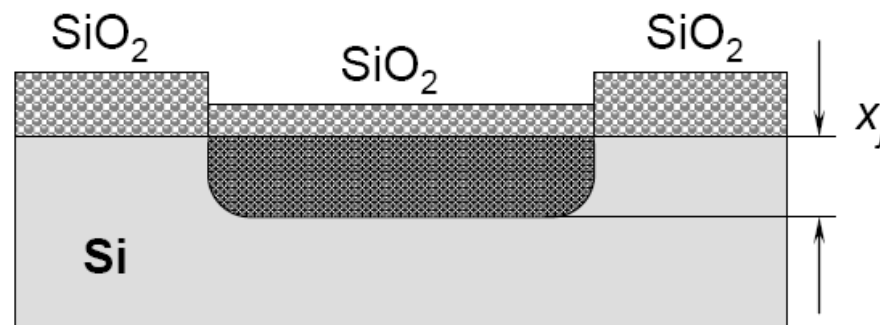
Termikus úton a megkívánt behatolási mélységig (x_j) mélységig hajtják a diffundáltatandó anyagot. (A diffúzió behatolási mélysége: ahol az adalékatom koncentrációja megegyezik az alatta lévő réteg adalékatomjának koncentrációjával - metallurgiai átmenet.)

$Q \approx$ állandó, állandó anyagmennyiséget diffundáltatnak.

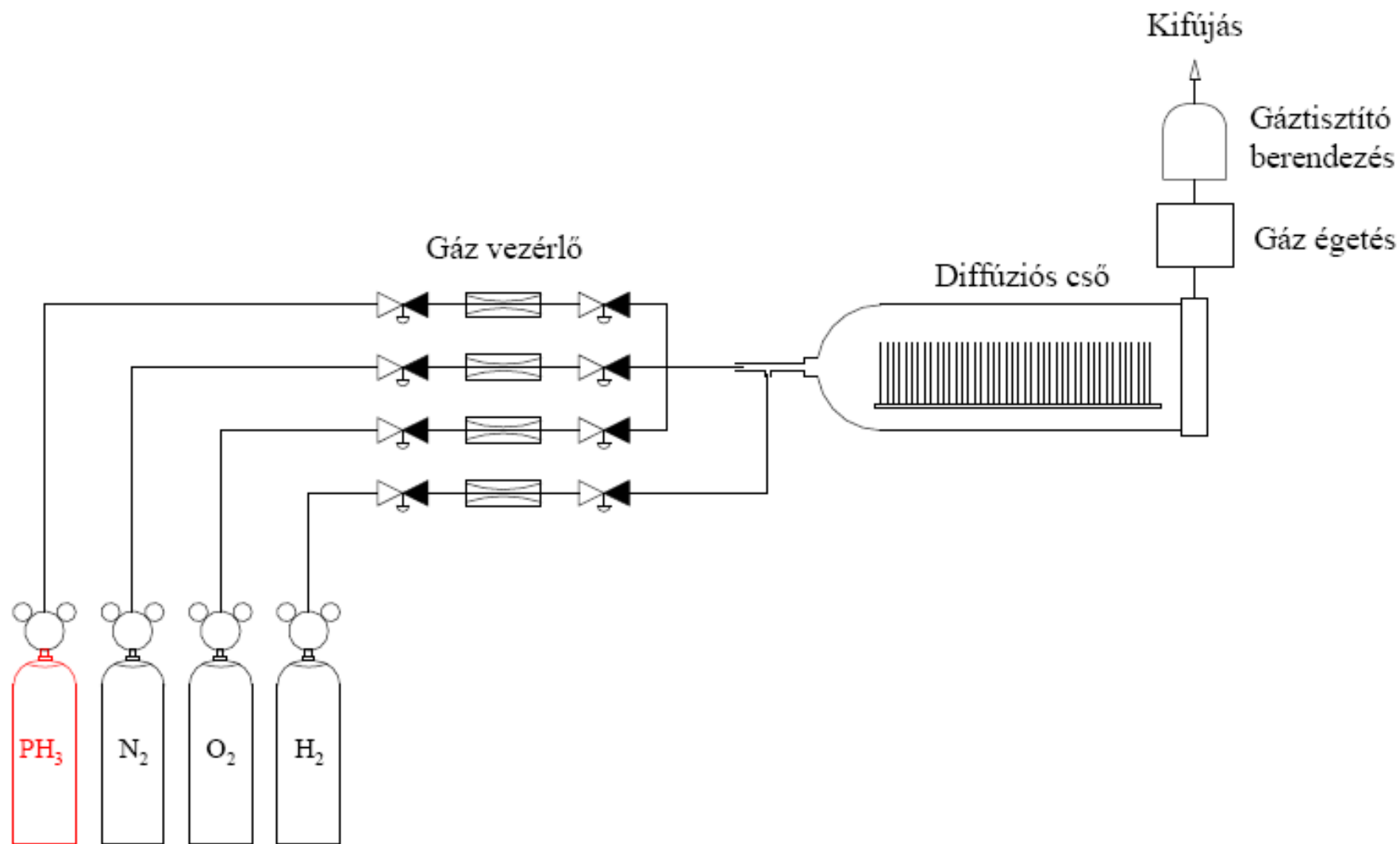
Általában kemencében 1000-1300°C tartományban végzik.

Idő: - 30 perctől akár 10 óra.

Oxigén áramban végezhető, ekkor SiO_2 nő további maszkolás céljából.

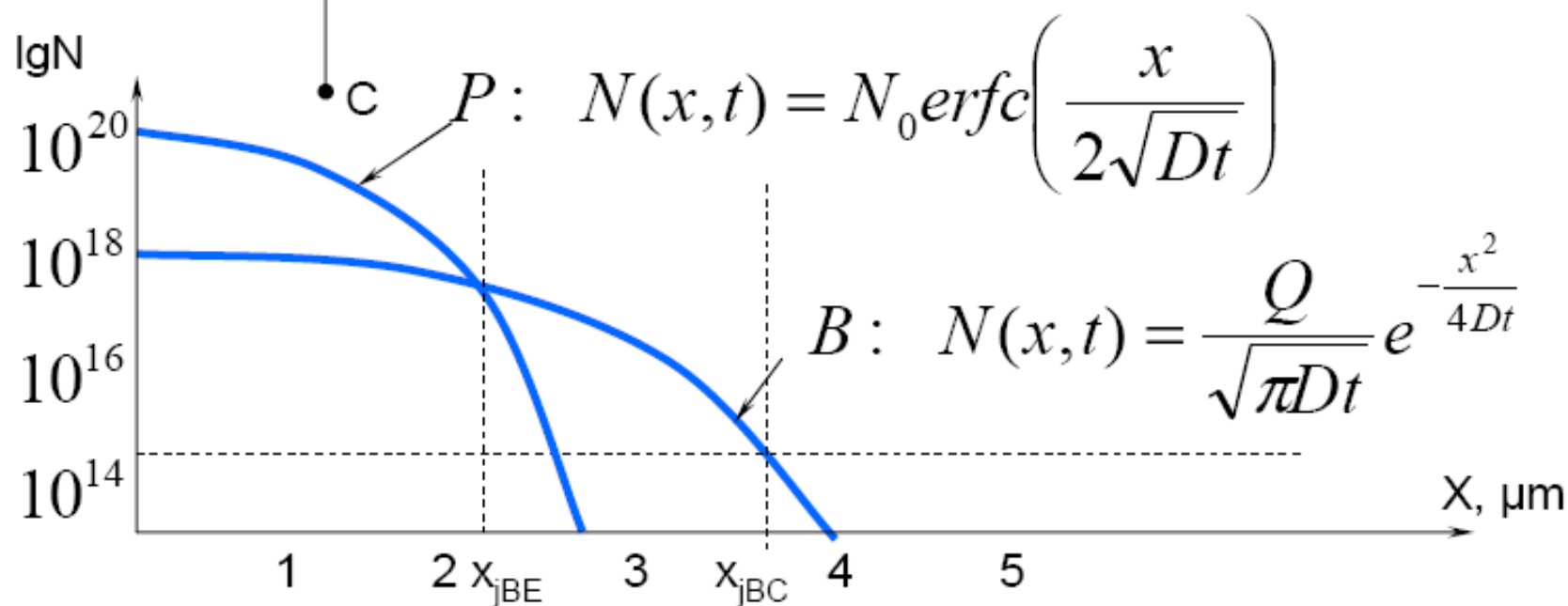
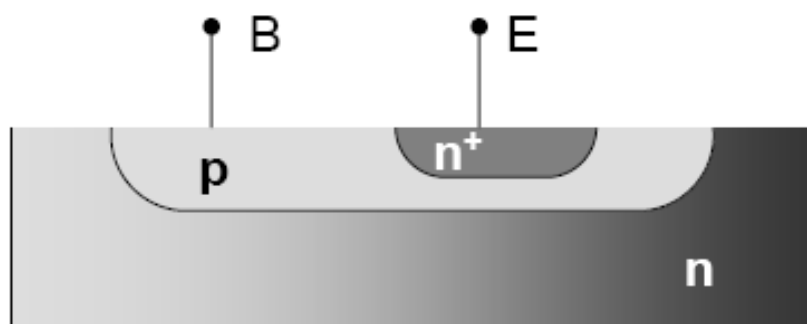


Diffúziós kályha és a gázrendszer



Bipoláris tranzisztor diffúziója

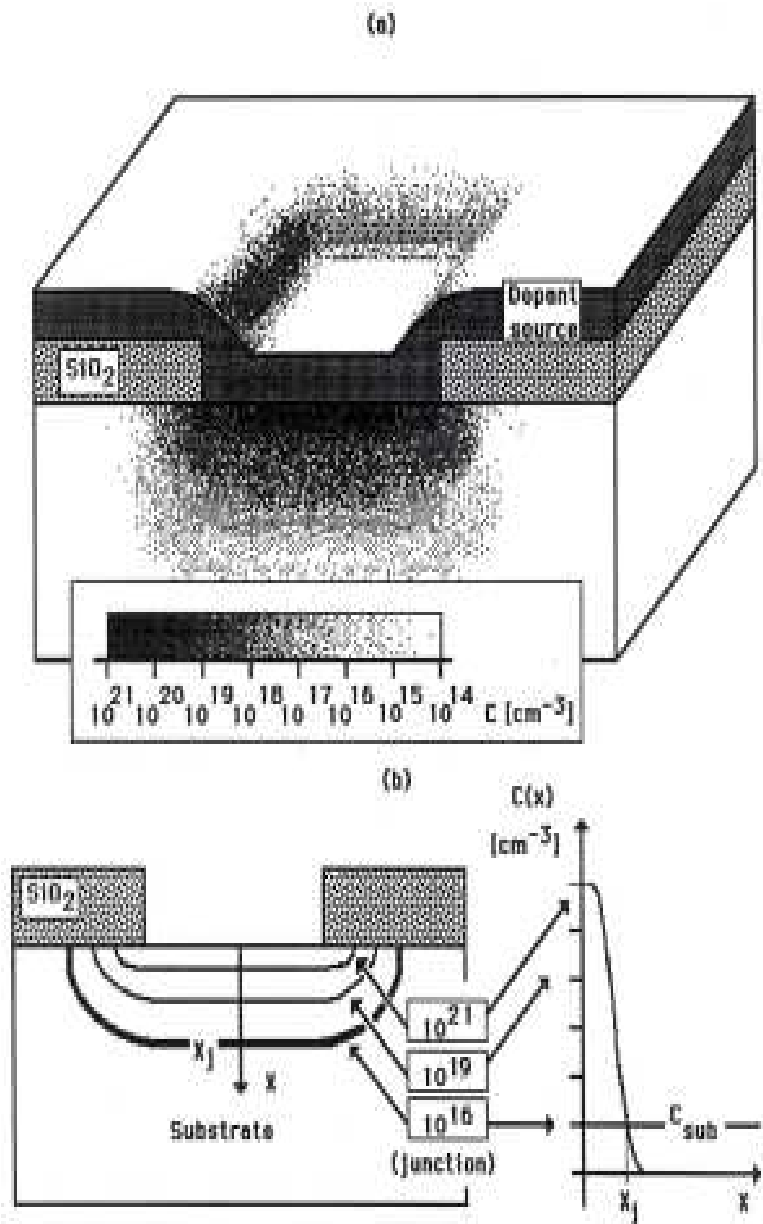
nnp bipoláris tranzisztor



Aládiffundálás

A diffúzió nem csak vertikális irányban történik!

A laterális mérettől függ az aládiffundálás hatása

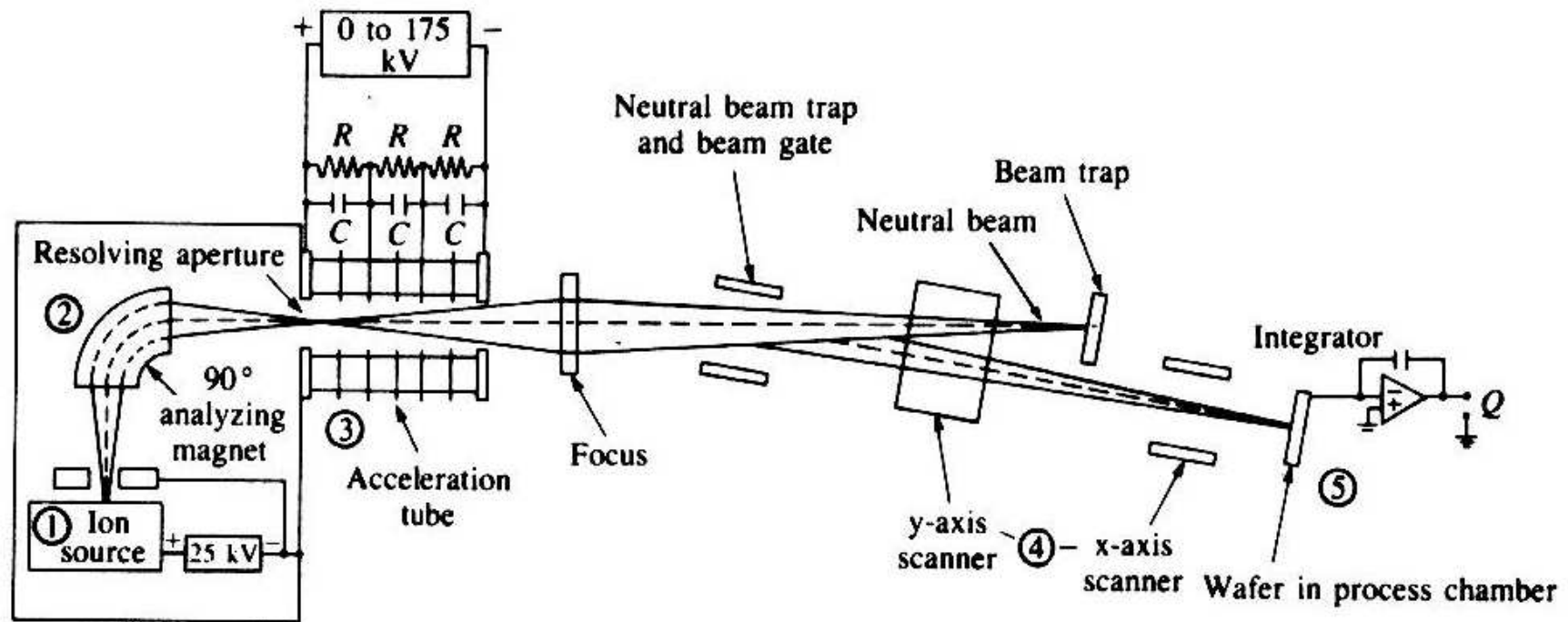


Ionimplantáció

A kívánt adalék atomokat felgyorsított ionokként (pl. B^+ , P^+ , As^+) belövik a félvezető szelet felszíni, felszín közeli rétegeibe. Nagy vákuum szükséges. Mind rétegnövelő, mind rétegalakító művelet. Erősen nem egyensúlyi folyamat (pár keV-MeV a becsapódó ion energiája).



Az ionimplanter felépítése



A becsapódó ion energiája jól szabályozható a gyorsító feszültséggel. Mágneses térrel hangolható m/q szelekció, ez igen tiszta technológiát tesz lehetővé.

Az ion-nyaláb képes végigpásztázni a hordozó felületét.

A target-tartó vákuum zsilipben helyezkedik el, hogy ne kelljen szelet cserénél újra leszívni az ultranagy vákuumot (UHV)

Az ionok fékeződése

Az ionimplantáció porlasztással jár (kis és közepes energiák esetén is): egy belépő ionra 5-10 porlasztott ion jut.

A belépő ionok fékeződését ütközések sorozatában a Coulomb-erők okozzák.

Kétféle mechanizmus:

- elektronfékeződés,
- nukleáris fékeződés.

A fékeződés mechanizmusa az ion pillanatnyi energiájától függ.

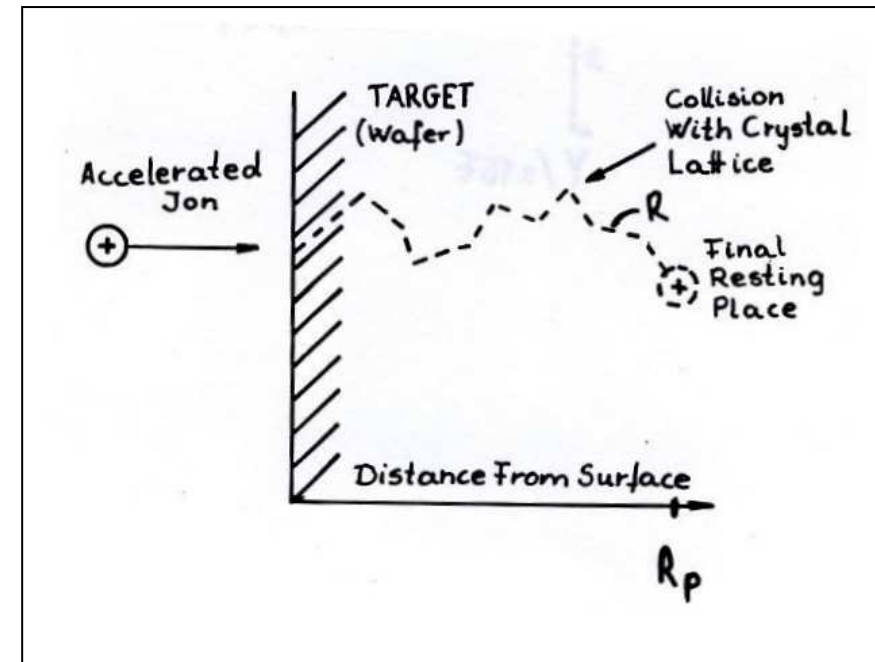
Elektronfékeződés

Belépő ionok és a szubsztrát atomjainak elektronfelhői közti kölcsönhatás.

Ez dominál nagyobb (1 MeV-100 keV) energiákon.

„Rugalmatlan” folyamatok, azaz az ionok kinetikus energiája fény -, röntgensugárzás formájában emésztődik fel.

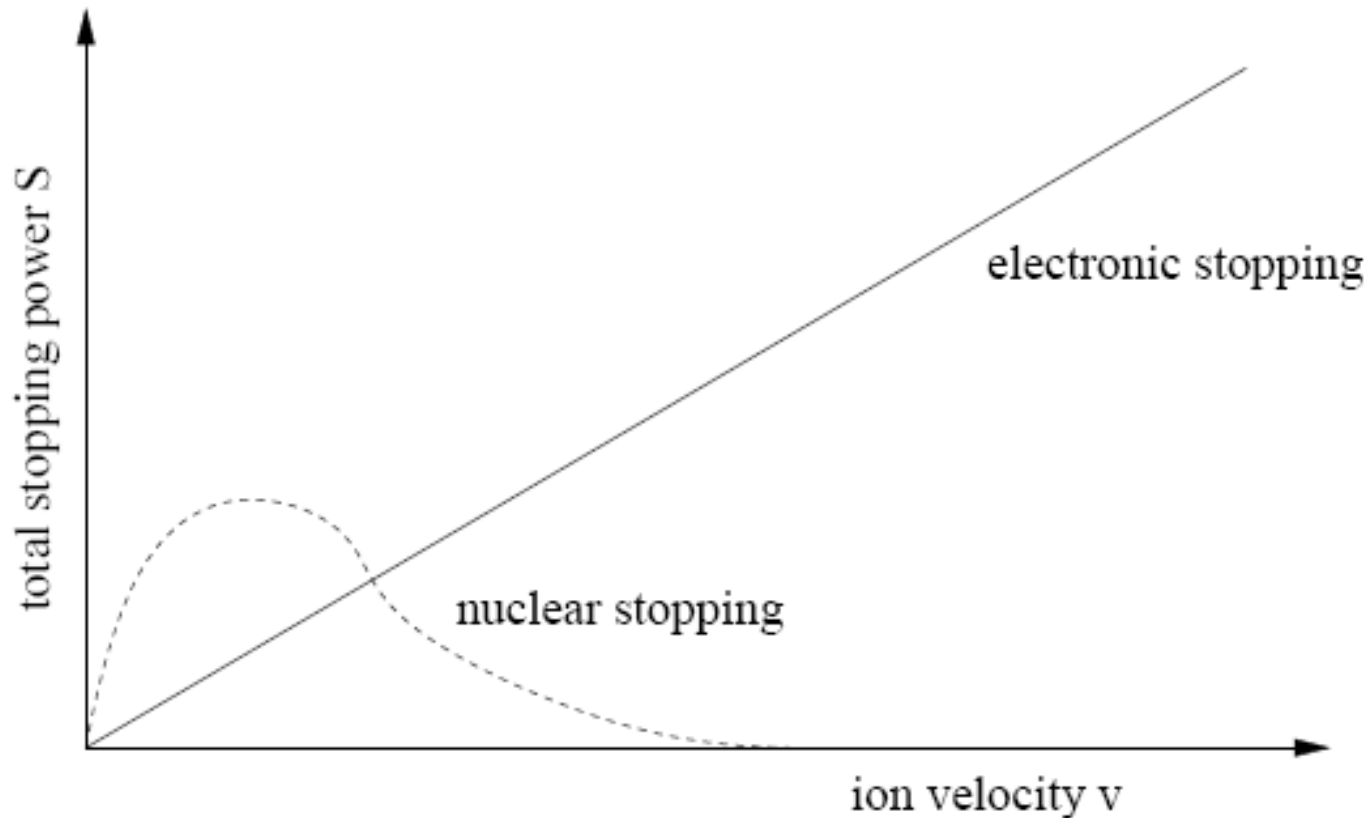
Polarizálja a rácsot, de kevés, zömmel ponthibát kelt csak.



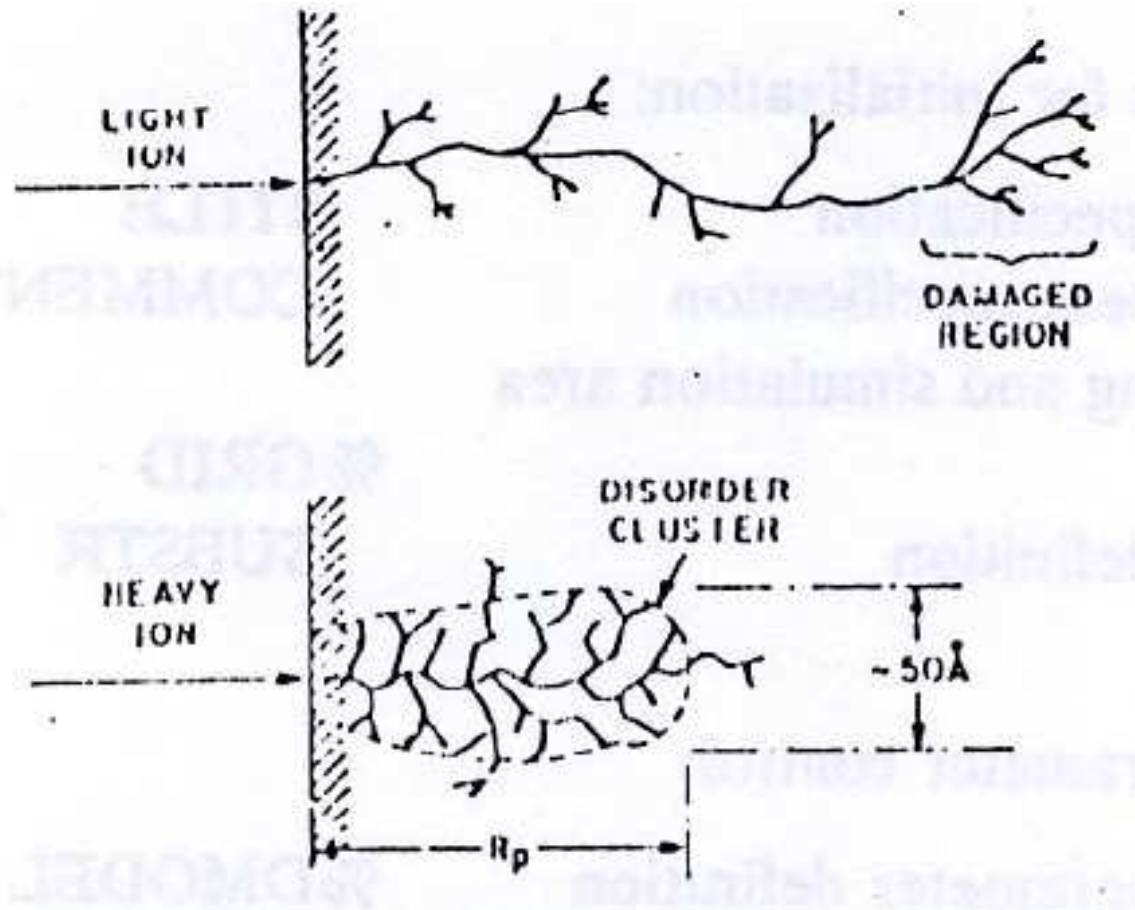
Nukleáris fékeződés

Kisebb energiákon a magok közti Coulomb kölcsönhatás dominál.
Rugalmas ütközés, képes rácsatomokat kiütni a helyükről - rácshibák keltése.

Fékező hatások összehasonlítása



Kaszkádok, sérült tartományok és amorfizáció



Könnyű és nehéz ion által keltett rácshibák. Sok rácshiba esetén a felületi réteg amorfizálódik.

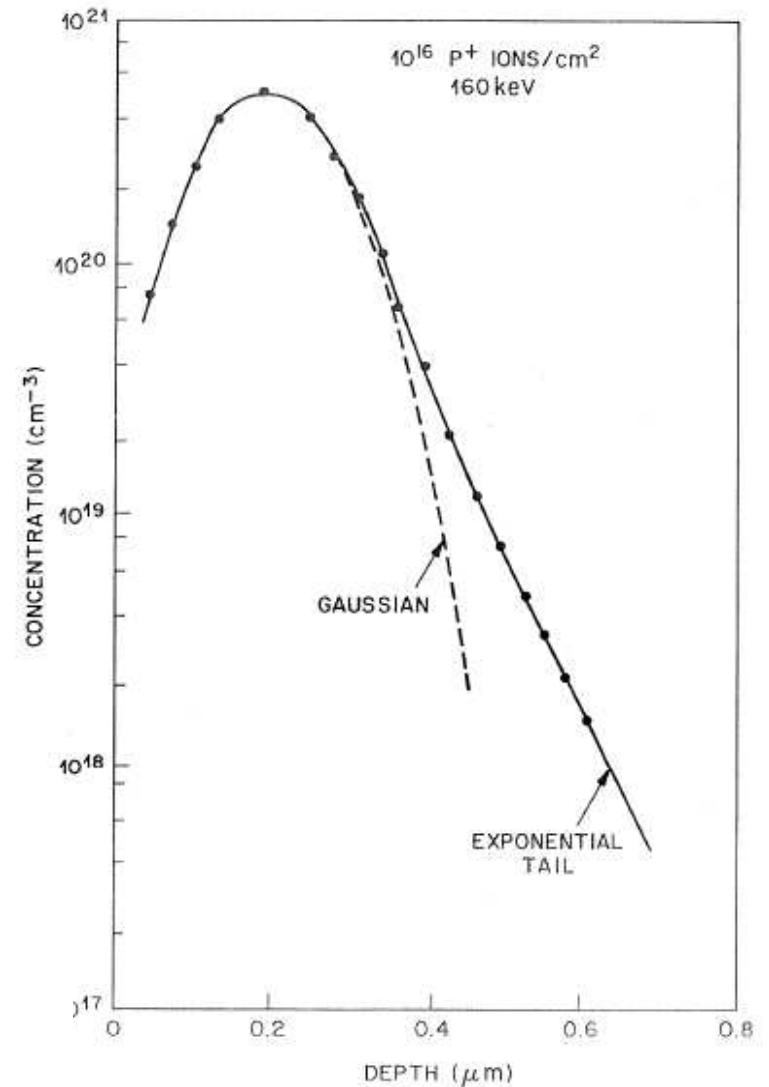
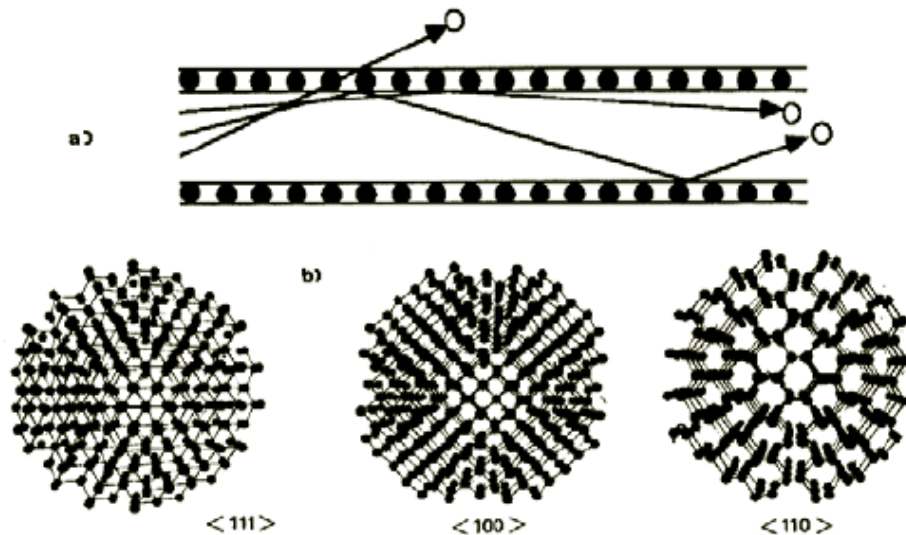
Adalékeloszlás

Az adalék mélységbeli eloszlása normál (Gauss) eloszlással írható le. A maximális koncentráció nem a felületen van.

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right]$$

ahol R_p a maximum mélysége, ΔR_p a szórás.
A maximum mélysége arányos az energiával.

Csatornahatás - exponenciális nyúlvány.



Kisebb adalékolás esetén nagyobb relatív hatás.

Csatornahatás megelőzése

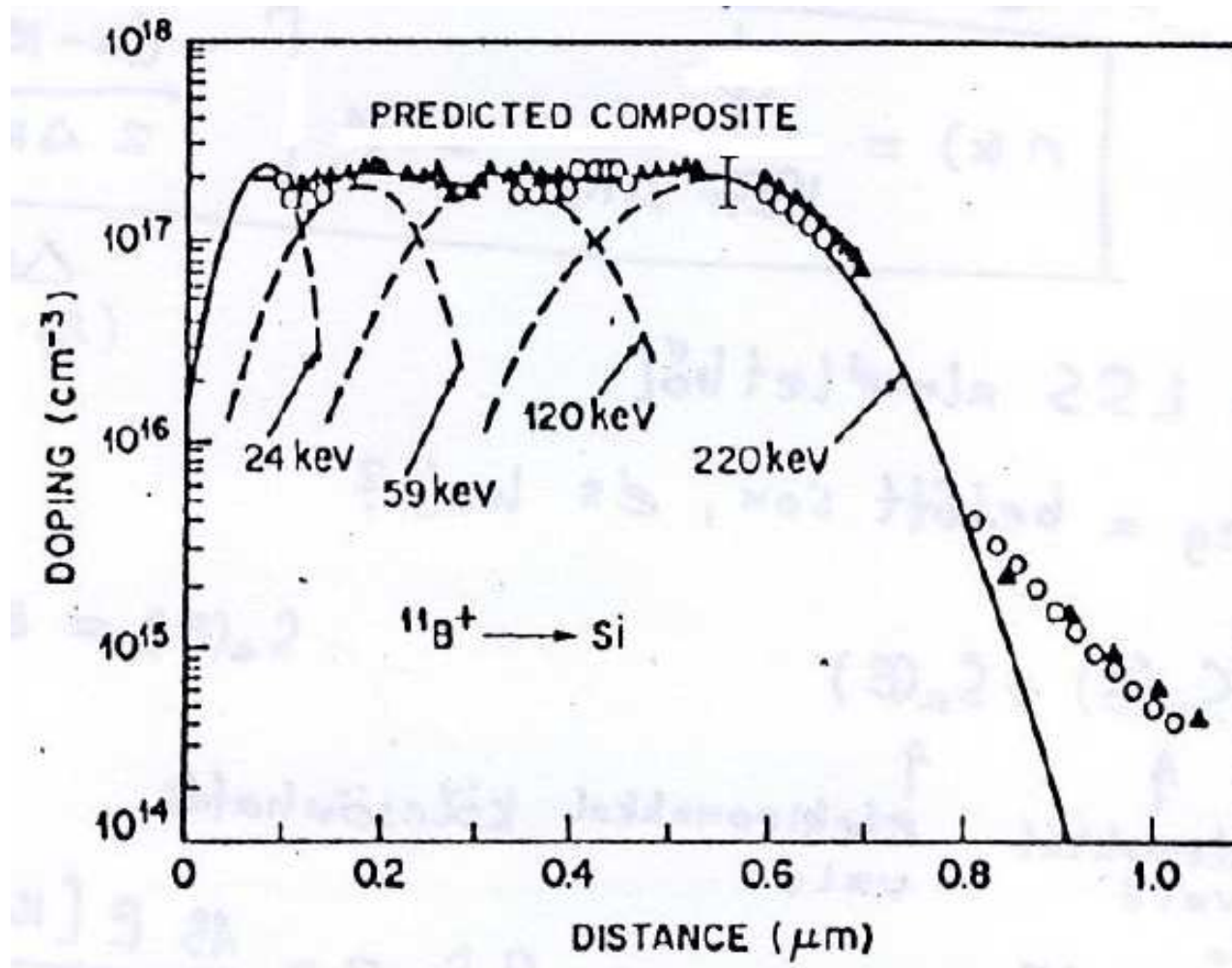
A szelet pozicionálása (döntés és csavarás).

Amorf vékony oxid réteg növesztése (20-25 nm).

A kristály felületi rétegének amorffá tétele implantációval (Pl. Si implantálás Si hordozóba).

Homogén adalékprofil létrehozása

Több lépésben különböző energiákkal:



Hőkezelés

Implantáció után kétlépéses hőkezelés:

1. lépés: az implantáció okozta roncsolás (kristályhibák) kijavítása. Már 700-800°C-on is újra rendeződik az egykristály szerkezet.

2. lépés: adalékatomok aktivizálása ~ 1000 °C – az adalékatomok beépülnek a kristályrácsba (intersticiális \rightarrow szubsztitúciós átmenet)

A hőkezelésnek összhangban kell lennie az egyéb technológiai lépésekkel (Pl. ne indítson el egy diffúziós folyamatot)

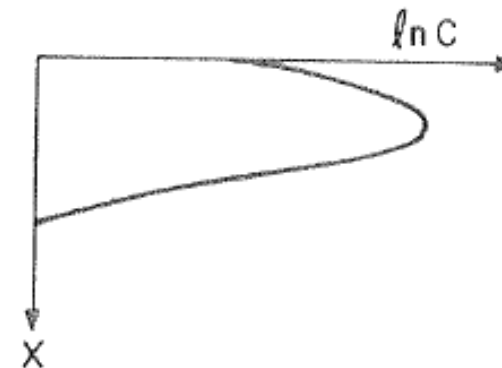
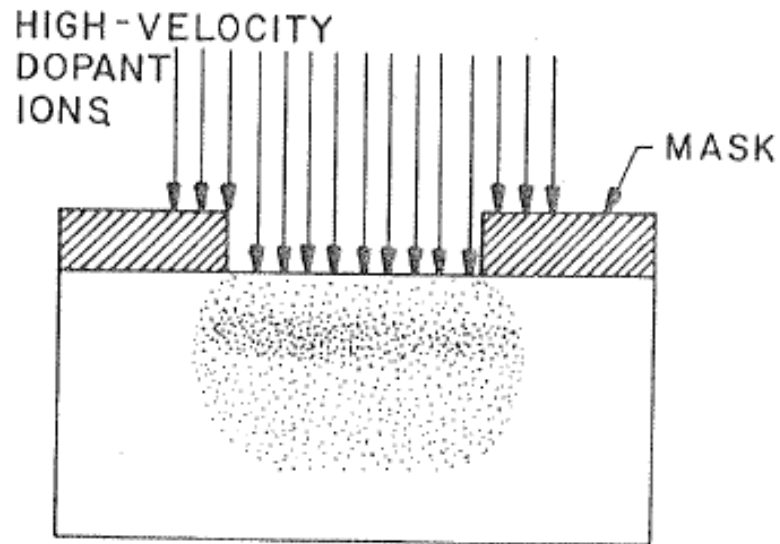
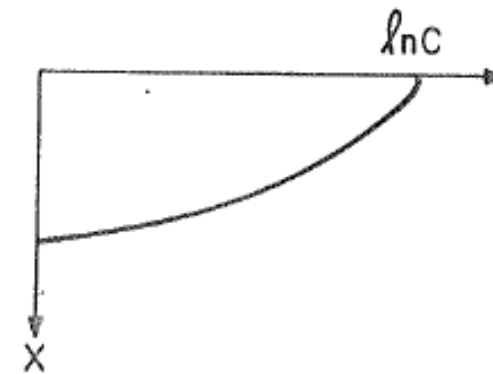
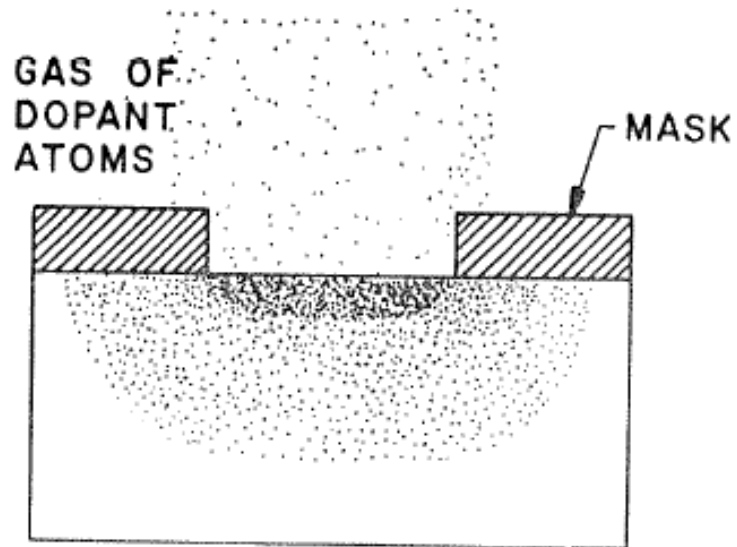
Előnyök

- Nagyon pontos.
- Kis oldalirányú szóródás.
- Tömeg szeparáció lehetséges.
- Utólag is lehetséges új réteg létrehozása.
- Meredek adalékprofil hozható létre.
- Alacsony hőmérsékleten végezhető.
- A vákuum miatt igen tiszta eljárás.
- Az egyensúlyi technológiákhoz képest nagyobb koncentráció is létrehozható.

Hátrányok

- A rácsszerkezet rongálódik.
- Nehéz atomokkal csak sekély implantáció valósítható meg.
- Alacsonyabb termelékenység, mint diffúzióval (korlátozott szeletszám)
- Drága, bonyolult berendezések.
- Veszélyes üzemeltetés.
- Utólagos (két lépéses) hőkezelés szükséges az adalékok aktiválásához és a roncsolás megszüntetéséhez.

Diffúzió és ionimplantáció összehasonlítása



Ellenőrző kérdések

Milyen reakciók mennek végbe neutron-transzmutáció közben?

Melyek a diffúziós mechanizmusok?

Milyen a diffúziós profil állandó felületi koncentráció esetén?

Milyen a diffúziós profil állandó anyagmennyiség esetén?

Miért térnek el az elméleti diffúziós profilok a valós profiloktól?

Miért magas hőmérsékleten hajtják végre a diffúziót?

Hány lépésben történik az adalékok diffúziója?

Mi az aládifundálás?

Mi az ionimplantáció?

Hogyan készítenek közel homogén mélységeloszlású adalékolást ionimplantációval?

Milyen fékeződési mechanizmusok vannak ionimplantáció esetén?

Mi a csatornahatás?

Miért hőkezelik a szeletet ionimplantáció után?