

Rétegnövesztés, rétegleválasztás I.

Általános kérdések

Mi a vékonyréteg?

- „vékony” – $<1\mu\text{m}$ (1000nm, 10.000Å)
- „réteg” – hordozóra leválasztott (hordozó nélkül; fólia)

Alkalmazás

Mikroelektronika, félvezető és MEMS technológia:

vezető rétegek (fém, szilicid): ohmos és Schottky kontaktusok, vezetékek, összeköttetések, ellenállások, kapacitások

félvezető rétegek: homo- és heteroepitaxiás szerkezetek, SOI, gate, összeköttetések, ellenállások, napelemek, vékonyréteg tranzisztorok és áramkörök

szigetelő rétegek: szigetelés, felületpassziválás, maszkolás, antireflexiós rétegek, védőrétegek

Optikai elemek: szűrők, rácsok, antireflexiós rétegek, tükrök

Gáz-, bio- és egyéb érzékelők: érzékelő és katalizátor réteg

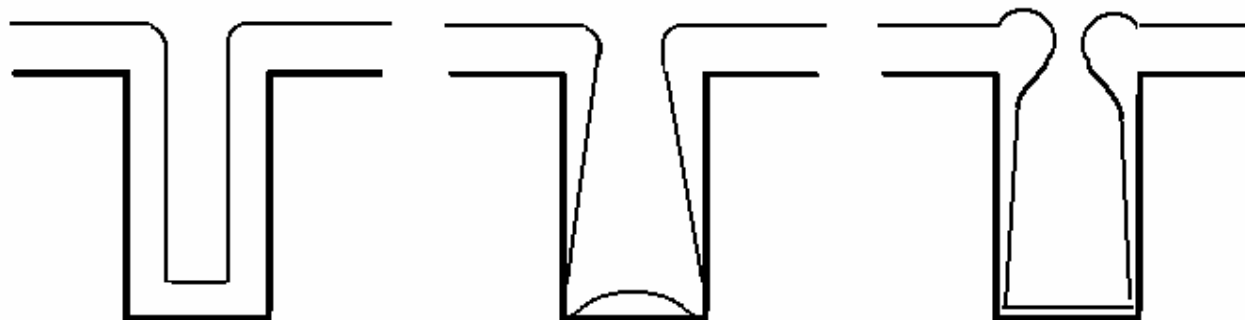
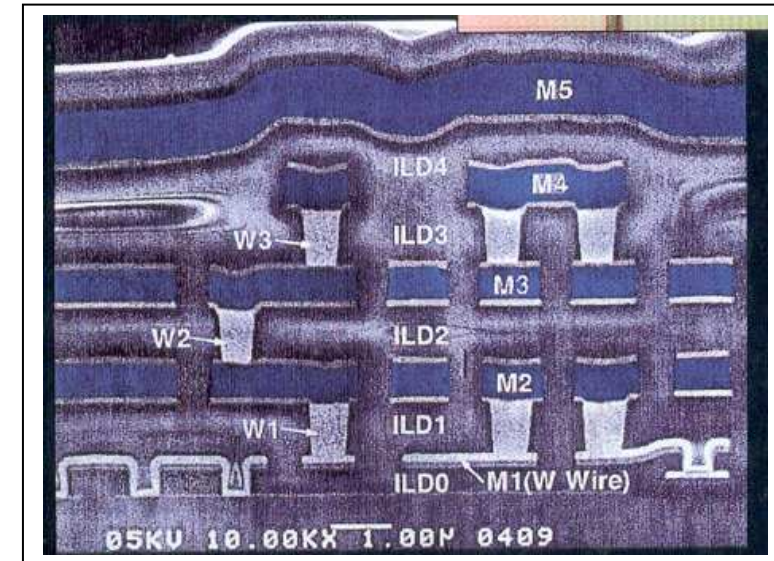
Hőelvezető bevonatok

Korrózió-, és kopásgátló rétegek

Dekorációs bevonatok

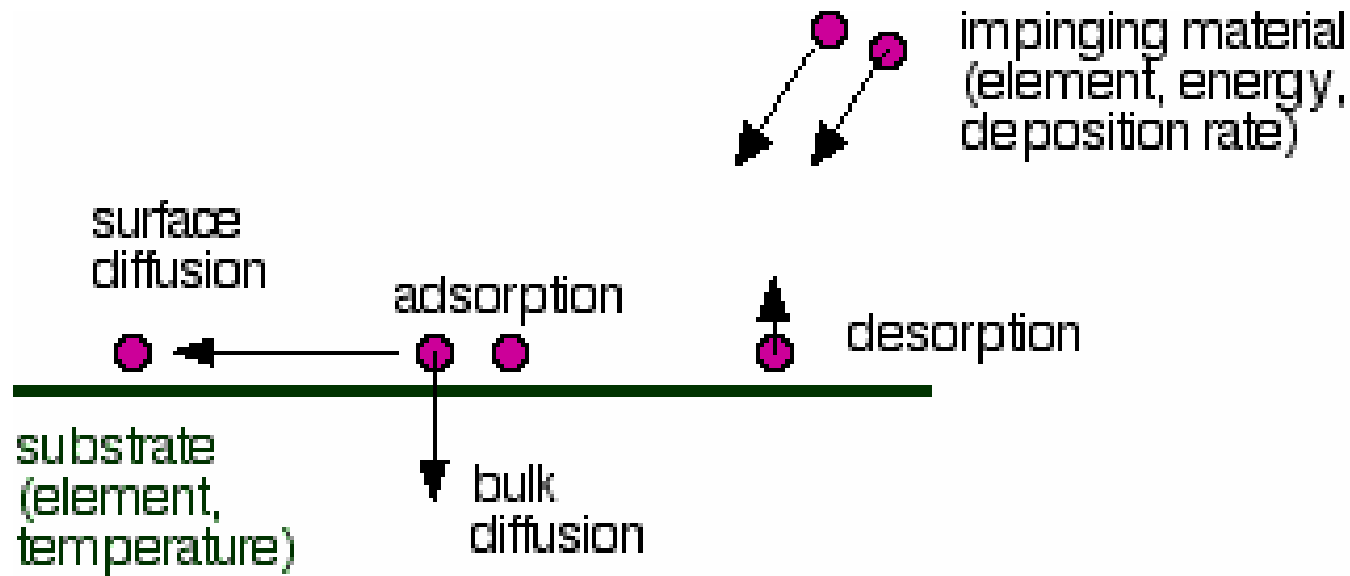
Általános követelmények

- egyenletes vastagság a teljes hordozón
- azonos összetétel
- azonos szerkezet (amorf, polikristályos, epitaxiális)
- azonos fizikai és kémiai tulajdonságok
- tömörség (szivacsos, túlyuk)
- tapadás
- kis termomechanikai feszültség
- speciális követelmények (súrlódás, nedvesítés, biokompatibilitás, stb.)
- gazdaságosság
- lépcsőfedés



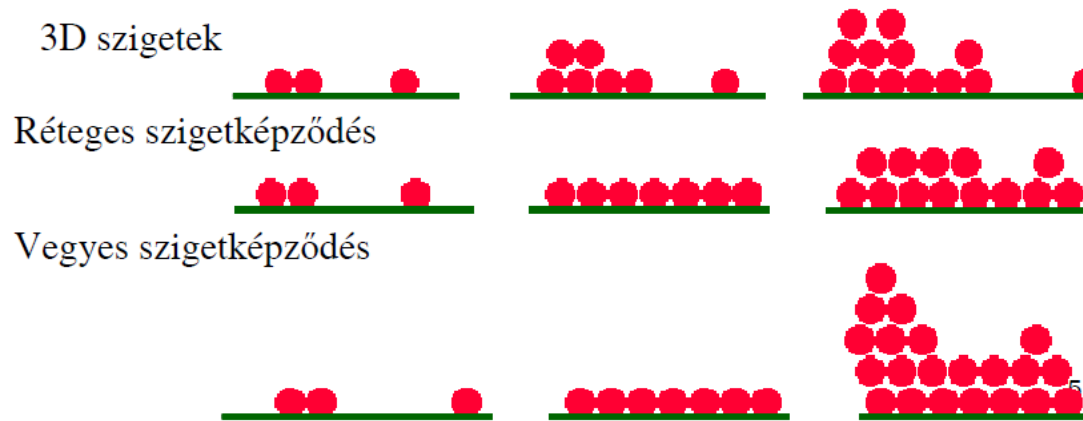
A leválasztás folyamata

- 1., A részecskék emissziója a forrásból (hő, nagyfesz...)
- 2., A részecskék transzportja a hordozóig (szabad, irányított)
- 3., A részecskék lecsapódása a hordozó felszínére (adszorpció)
hőcsere: túl nagy energiájú részecskék reflektálódnak
fizikai, kémiai kötés

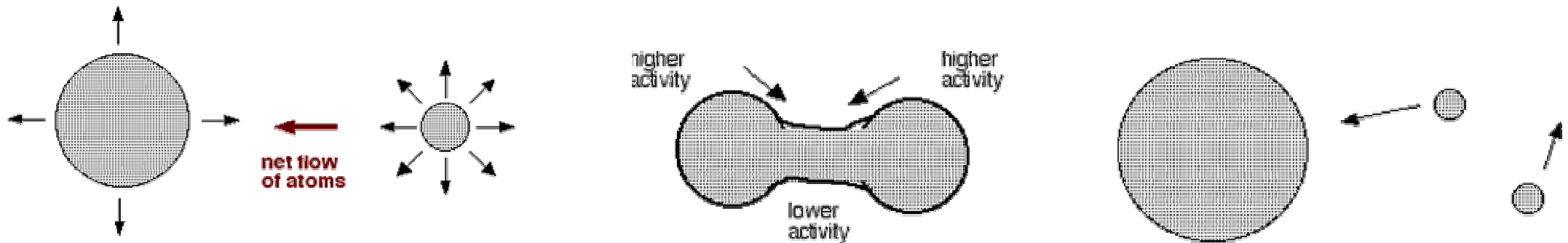


- 4., Felületi diffúzió (segíti a szemcsék kialakulását)
- 5., Nukleáció (szemcsék kialakulása)

6., Szigetképződés



7., Szigetek egybeolvadása



- Kisebb szigeteket könnyebben hagyják el az atomok, mint a nagyobbakat.
- A részecskék a felületi energia minimalizálására törekszenek.
- Szigetek növekednek a véletlenszerűen abszorbeálódott atomoktól.

8., Rétegek vastagodása

Függ:

Felületi diffúzió

Diffúzió a hordozóba

Deszorpció

Geometria

Hordozó hőmérséklete

Leválasztás üteme

A kristályszemcsék mérete nő
a rétegvastagság növekedésével
a hordozó hőmérsékletének növekedésével
és a leválasztás ütemének csökkenésével.

A réteg növekedését befolyásoló más tényezők

A hordozó felületi érdessége, atomi szerkezete, orientációja,
hibahelysűrűség

A gáztér, a forrás és a hordozó szennyezettsége

A becsapódó részecskék energiája

- Növelik a lokális hőmérsékletet (0,5-10eV)
- Porlasztják a felületi atomokat (10-20eV)
- Hibákat hoznak létre
- Feszültséget okoznak a rétegben

Vékonyréteg leválasztási, növesztési módszerek

Fizikai módszerek (PVD, Physical Vapour Deposition)

Szilárd forrásból: párologtatás, porlasztás, MBE (Molecular Beam Epitaxy)

Olvadékból: LPE (Liquid Phase Epitaxy)

Kémiai módszerek

Elektrolitból: galvanizálás (elektrolitikus leválasztás)

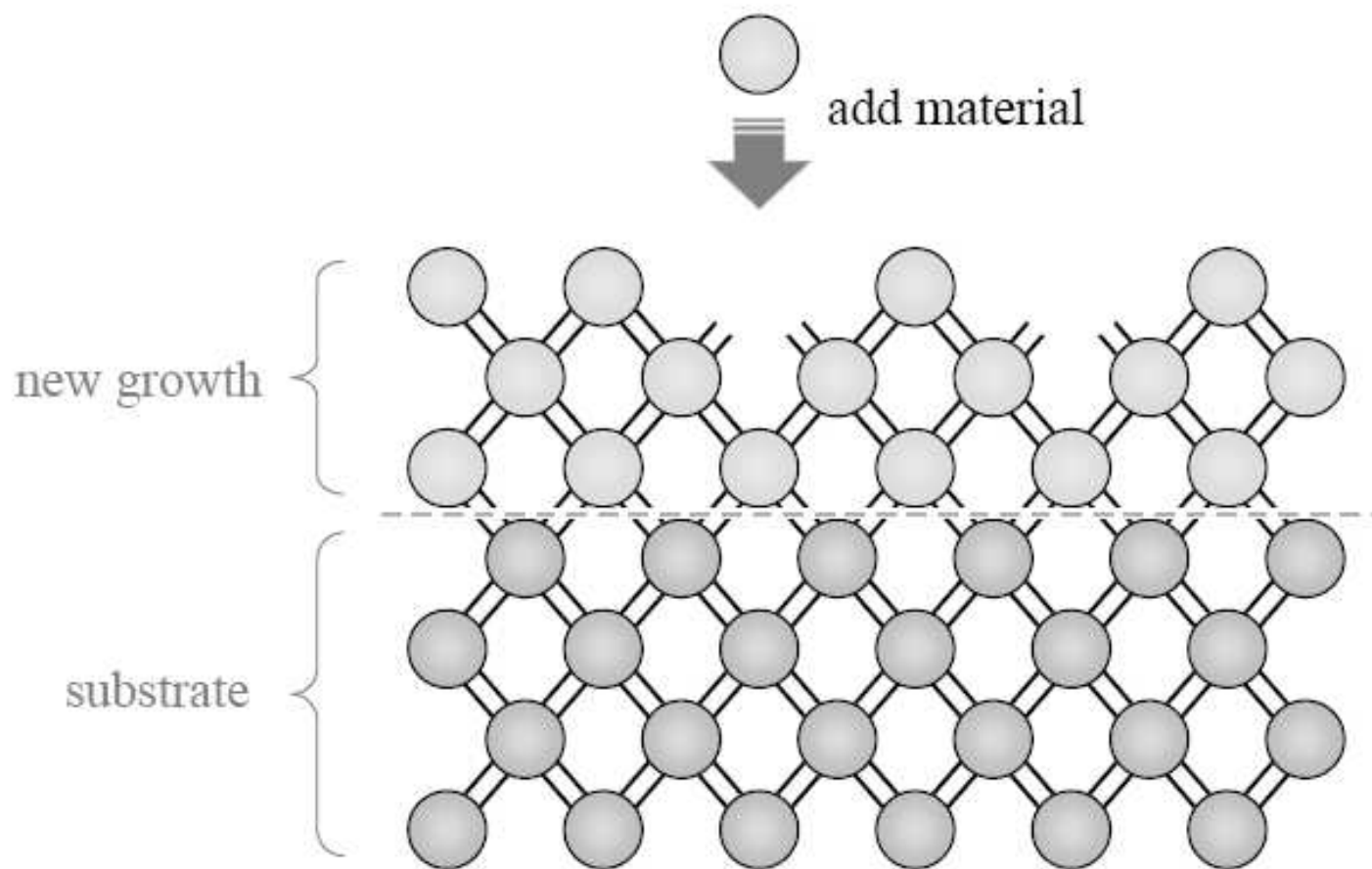
Oldatból, szuszpenzióból : lecsapatás

Gázfázisból: gőzfázisú epitaxia (VPE - Vapour Phase Epitaxy), kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD - Chemical Vapour Deposition), fémorganikus kémiai gőzfázisú leválasztás (MOCVD - Metal Organic Chemical Vapour Deposition)

Az anyag felületi reakciójával: oxidáció, nitridizáció, szilicidáció.

Epitaxia

Az epitaxia olyan rétegnövesztési eljárás, ahol a hordozó kristályszerkezetét és orientációját folytatja az új, felnövekvő réteg. A hordozó és a növesztett réteg egyetlen kristálszemcsét alkot.



Fajtái

Rétegszerkezet szerint

Homoepitaxia: a hordozóval azonos anyagból felépülő réteg.

Előny: jól beállítható rétegvastagság és adalékolás (adalékprofil), éles réteghatárok.

Heteroepitaxia: más anyagból felépülő réteg, de nagyon hasonló rácsállandóval. Pl: GaAlAs réteg GaAs hordozón (diszlokációk elkerülése).

Előny: a fentieken túlmenően heteroátmenetek létrehozása különböző összetételű rétegekből.

Növesztési módszer szerint:

Gőzfázisú - VPE: Vapour Phase Epitaxy

Fém-organikus gőzfázisú epitaxia - MOVPE: Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy (MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapour Deposition)

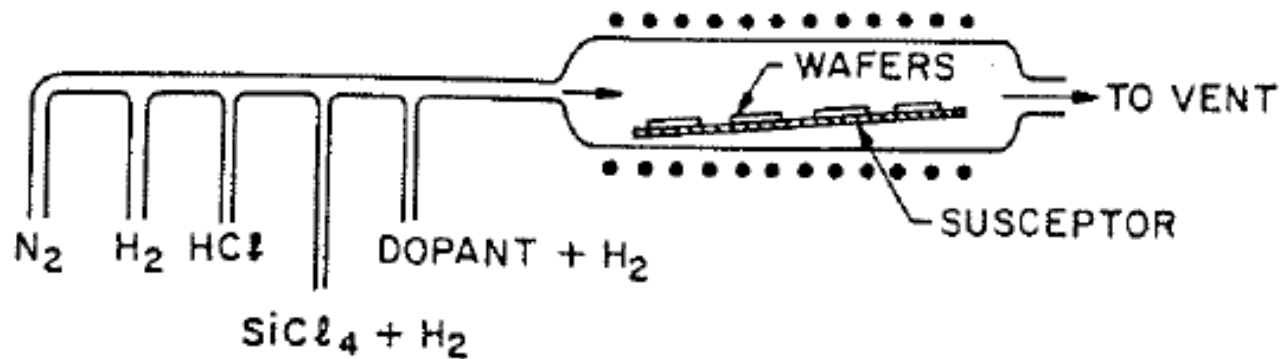
Folyadékfázisú - LPE: Liquid Phase Epitaxy

Molekulasugaras - MBE: Molecular Beam Epitaxy

A VPE és MOVPE kémiai, az LPE és MBE fizikai folyamatokon alapszik.

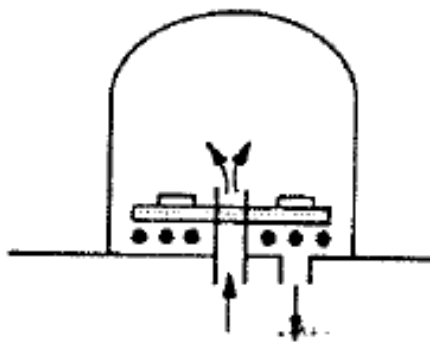
A rétegek növekedése az anyag olvadáspontja alatt történik.

Gőzfázisú epitaxia

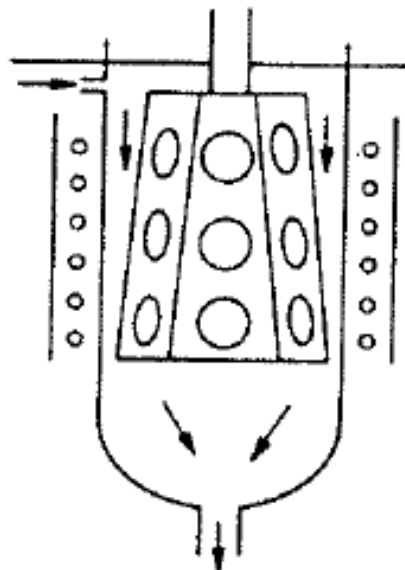


(a)

- GAS FLOW
- RF HEATING
- RADIANT HEATING



(b)

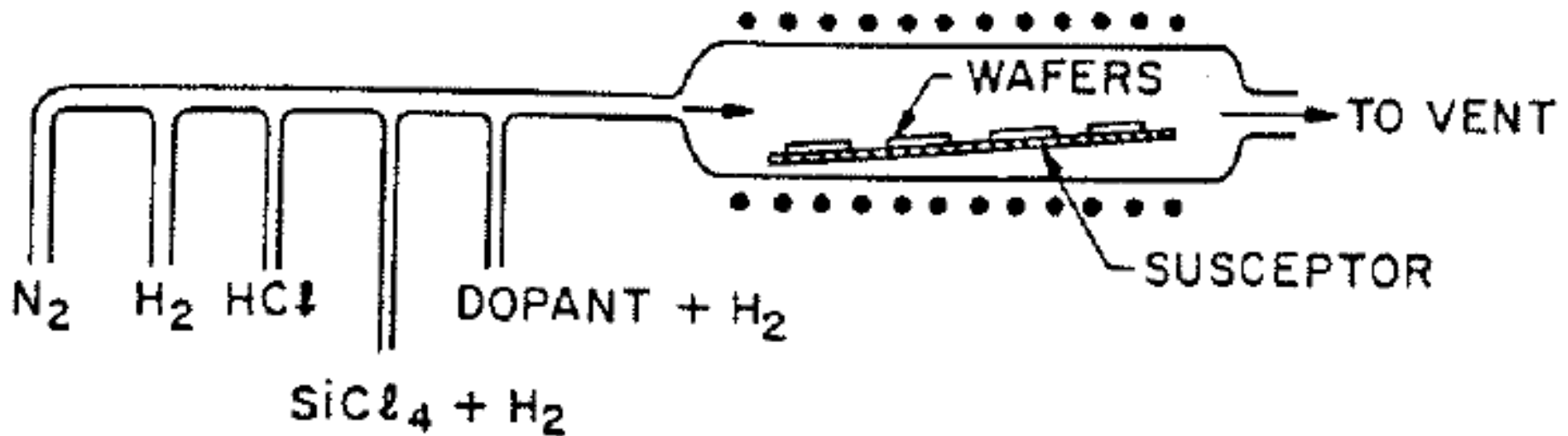


(c)

Kémiai reakción alapszik. A reaktáns gázokat és az adalékot vivőgázzal higitják. A hordozó hőmérsékletét úgy választják meg, hogy a szükséges kémiai reakció a hordozó felületén menjen végbe: rétegnövekedés. Ha a gáztérben megy végbe, részecskehullás: rücskös rétegnövekedés.

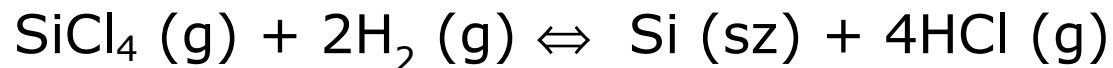
Különböző elrendezésű VPE reaktorok

Si réteg növesztése



Si réteget szilícium-tetrakloridból ($SiCl_4$), triklórszilánból ($SiHCl_3$), diklórszilánból (SiH_2Cl_2) vagy szilánból (SiH_4) növesztenek.

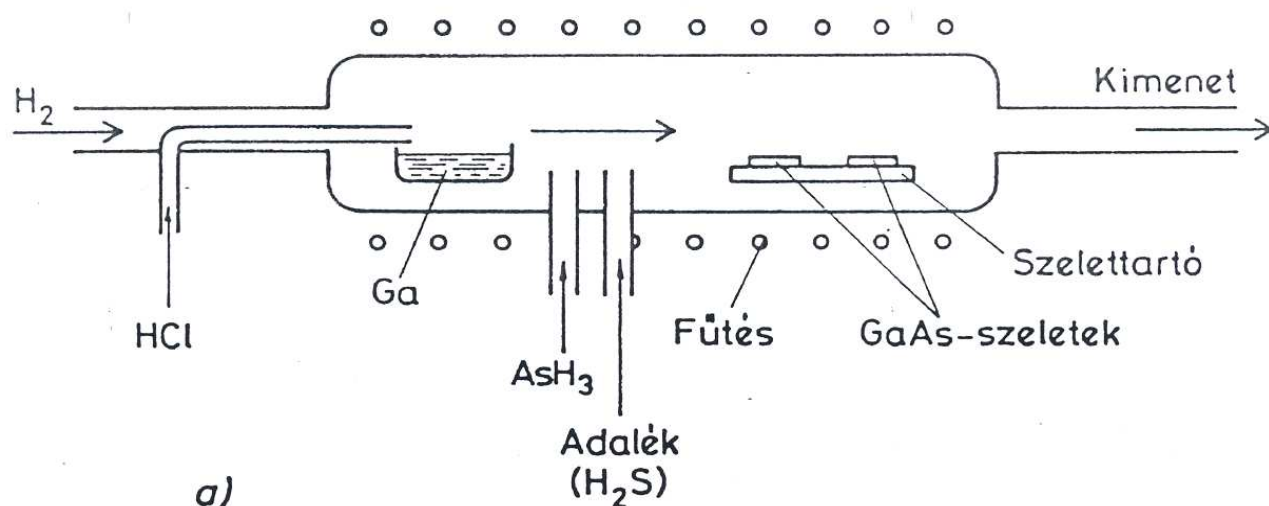
A reakció szilícium-tetraklorid és hidrogén reakciógázok esetén:



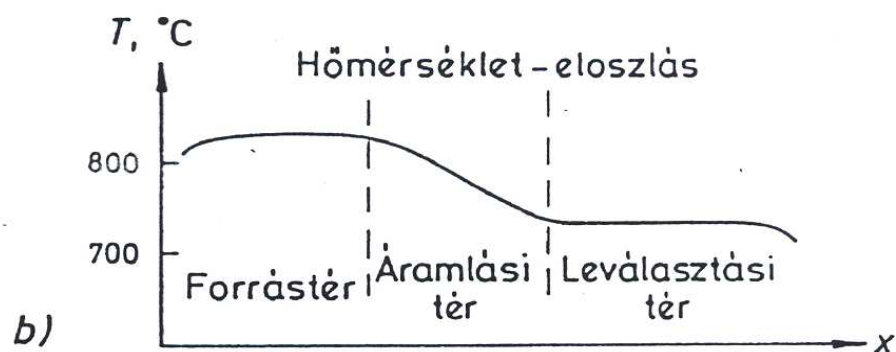
A reakcióhőmérséklet kb. $1200\text{ }^{\circ}C$. Az egyensúlyi folyamat nagy HCl koncentráció esetén visszafelé megy végbe (visszamarás): szelettisztítás vagy hibás felületi réteg eltávolítása növesztés előtt.

Adalékok: diborán (B_2H_6) (p-típusú) és foszfin (PH_3) vagy arsin (AsH_3).

GaAs réteg növesztése



a)

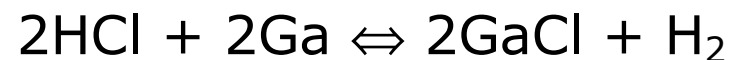


b)

$AsH_3/HCl/Ga/H_2$ rendszer
(hidrides rendszer)

Kiinduló anyagok: Ga és AsH_3
Segédanyag: HCl

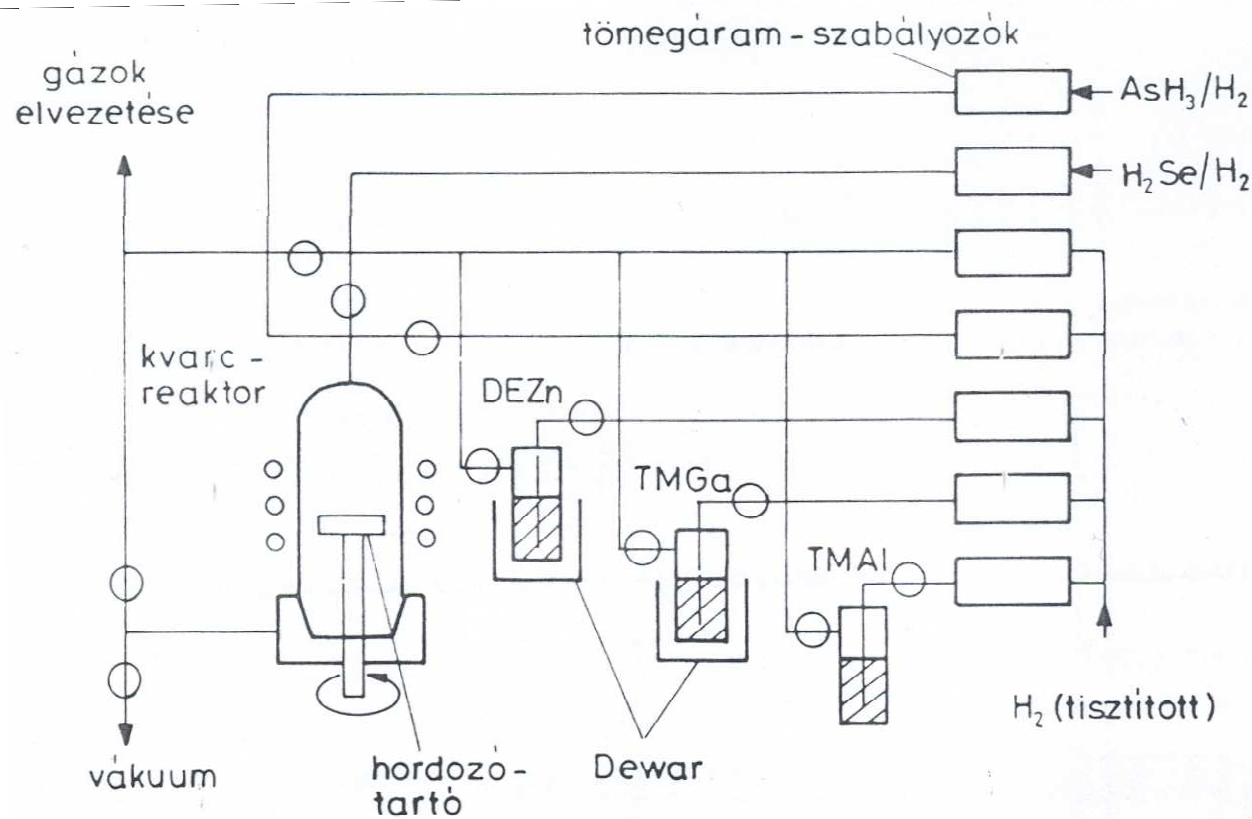
1., $GaCl$ és As_4 létrehozása a magashőmérsékletű zónában (kb. 800 $^\circ C$):



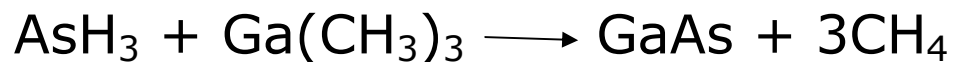
2., $GaAs$ létrehozása a szelet felületén (kb. 730 $^\circ C$):



Fém-organikus gőzfázisú epitaxia



GaAs réteg növesztése:

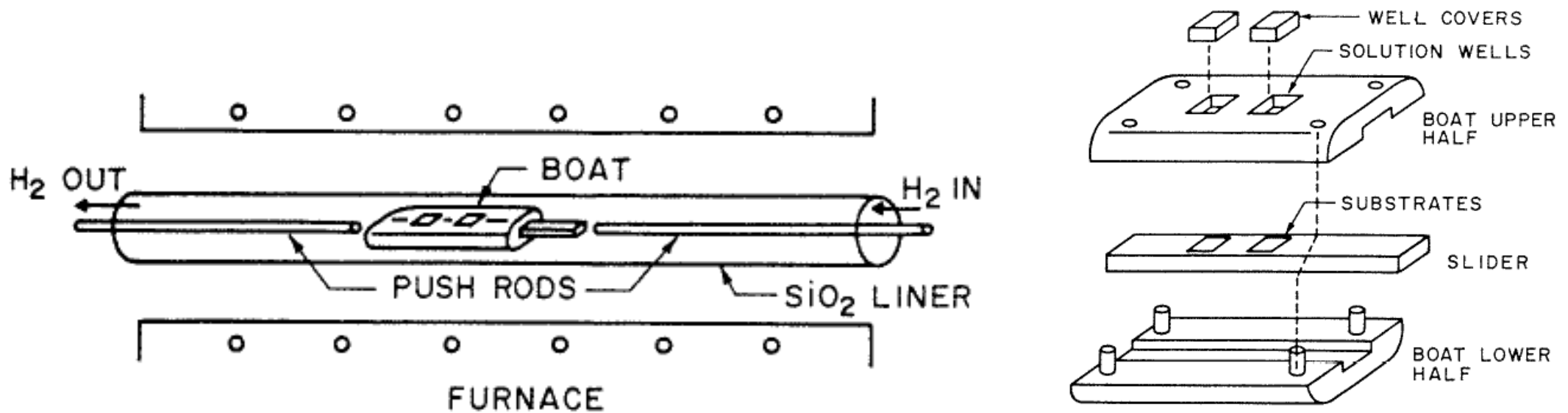


Fémorganikus vegyületeket használnak a II. ill. III. oszlopbeli összetevők beépítéséhez.

Pl. trimetilgallium $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, trimetilaluminium $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$. Ezek könnyen disszociálnak, de nagyon veszélyesek: gyúlékonyak és mérgezőek. Nagy körültekintést igényel a használatuk.

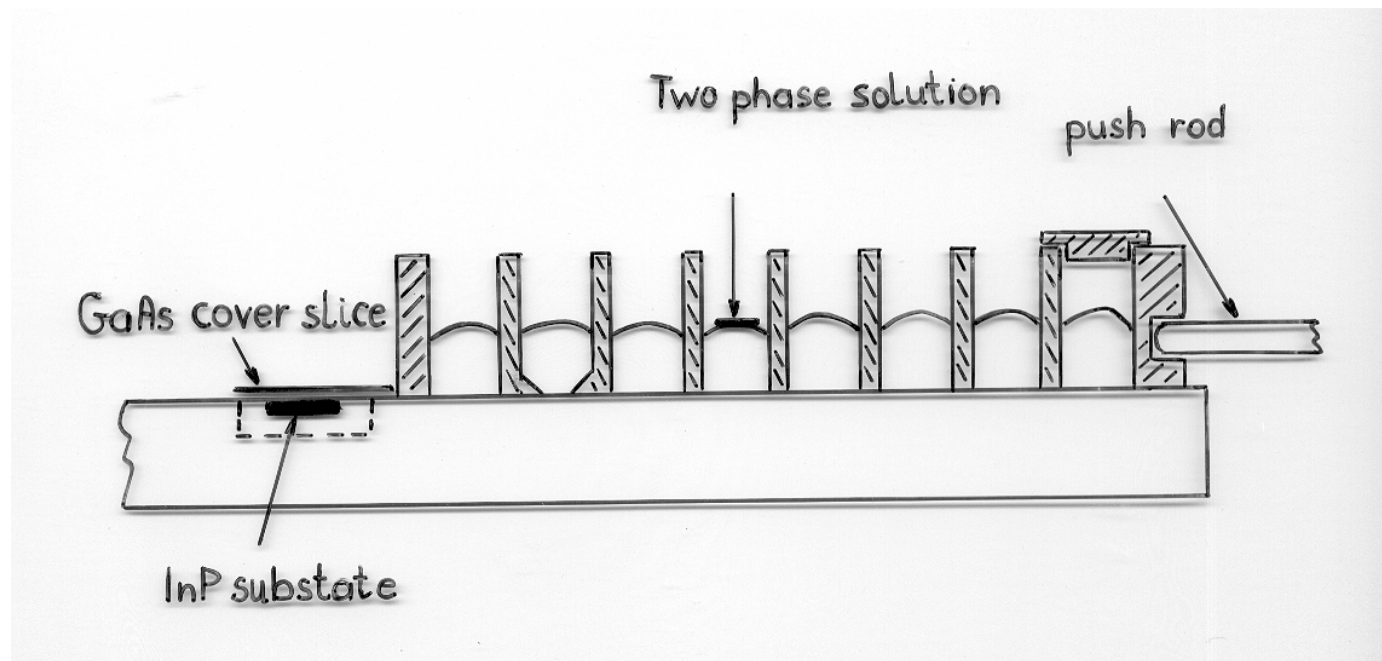
Előnyök: alacsonyabb növesztési hőmérséklet, lassúbb növekedés, így vékonyabb rétegek és pontosabb réteg-vastagságok, nagyobb rugalmasság az összetételben.

Folyadékfázisú epitaxia



Főképp III-V vegyületfélvezető rétegek növesztésére. A növesztendő anyagot feloldják valamilyen oldószerben (alacsony olvadáspontú fémbe: Ga, In, Bi - pl. GaAs-t galliumban). Az oldat olvadt állapotban van, hőmérséklete és olvadáspontja a leválasztandó anyag olvadáspontja alatt van.

Több különböző réteget lehet egymásra növeszteni több hordozóra. Az oldatokat a grafit csónak felső részében lévő nyílásokba, a hordozókat a csónak középső csúszkájába helyezik.



A hordozót a megfelelő oldat alá tolják, és állandó sebességgel (kb 1 °C/min) hűtik. A túltelítődő olvadékból az anyag a hordozó felületén kikristályosodik. Megvárják, hogy kellő vastagságú epitaxiás réteg nőjön a hordozóra, majd elhúzzák az oldat alól.

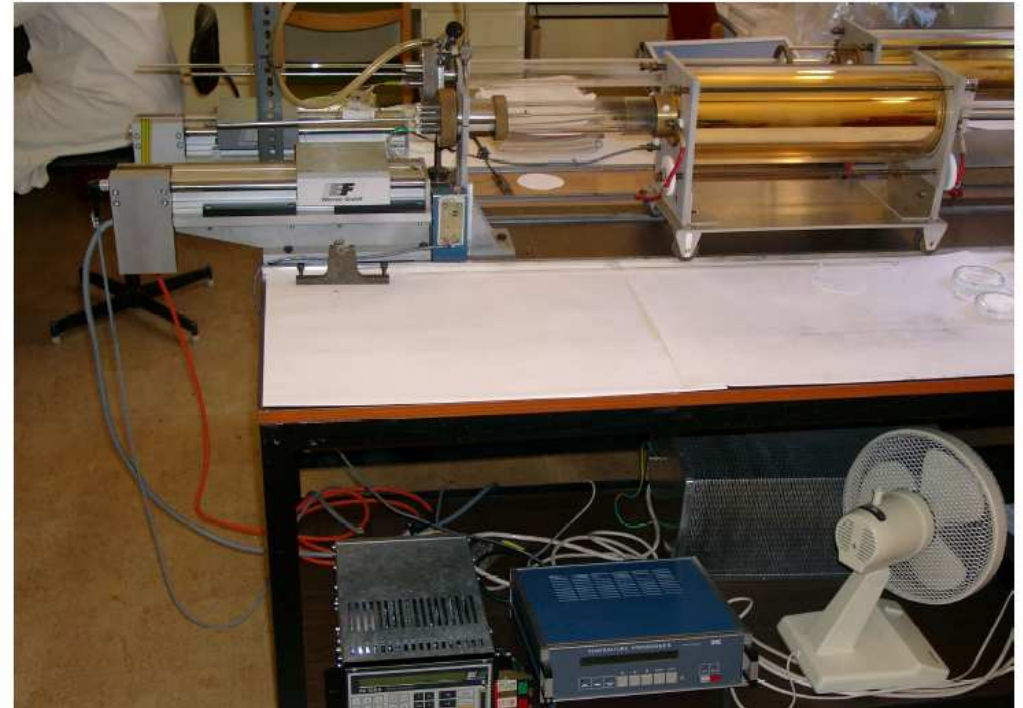
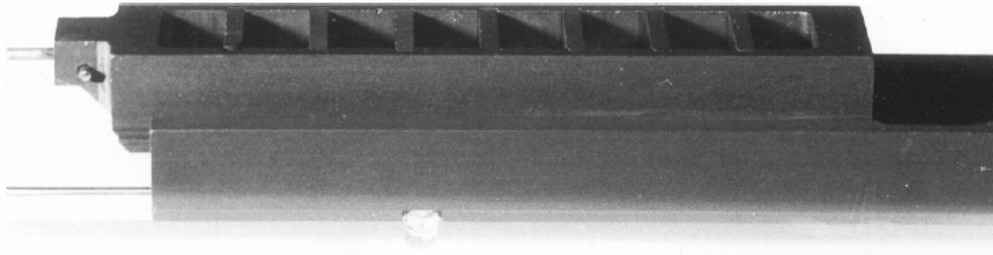
Tulajdonságok

Előnyök: egyszerű, biztonságos, kevés kristályhiba, vékony rétegek és összetett heteroszerkezetek növeszthetők.

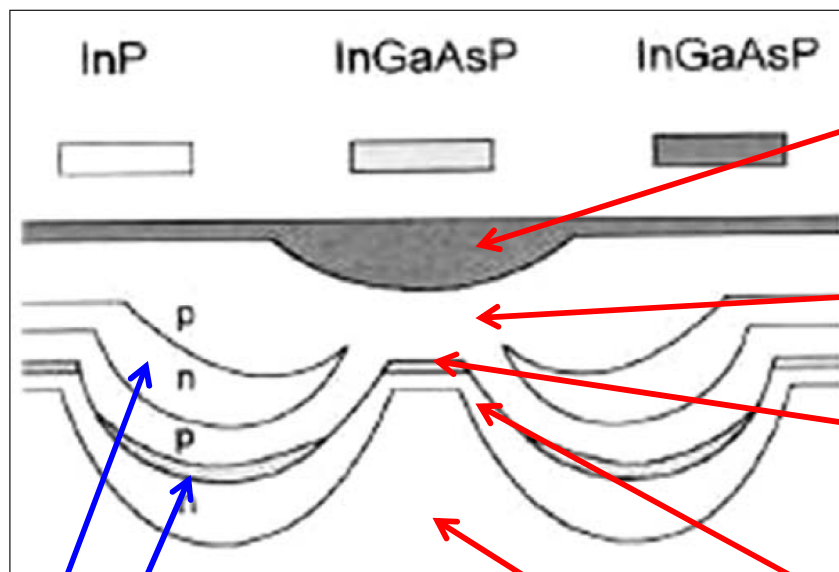
Hátrányok: lassú, nem alkalmas tömeggyártásra, a felület minősége nem jó.

Gyakorlati megvalósítás

Csónak és elrendezés



Folyadékfázisú epitaxiával növesztett lézerszerkezet



2. ábra

A duplacsatornás hordozójú, eltemetett aktív réteget és beépített záró réteget tartalmazó kettős heteroszerkezetű InP/InGaAsP lézerdióda felépítése

p⁺ InGaAsP kontaktus réteg 0,5-1,5 μm

p InP réteg 2-4 μm

(n) InGaAsP réteg 0,1-0,2 μm, $\lambda_G = 1,3 \mu\text{m}$

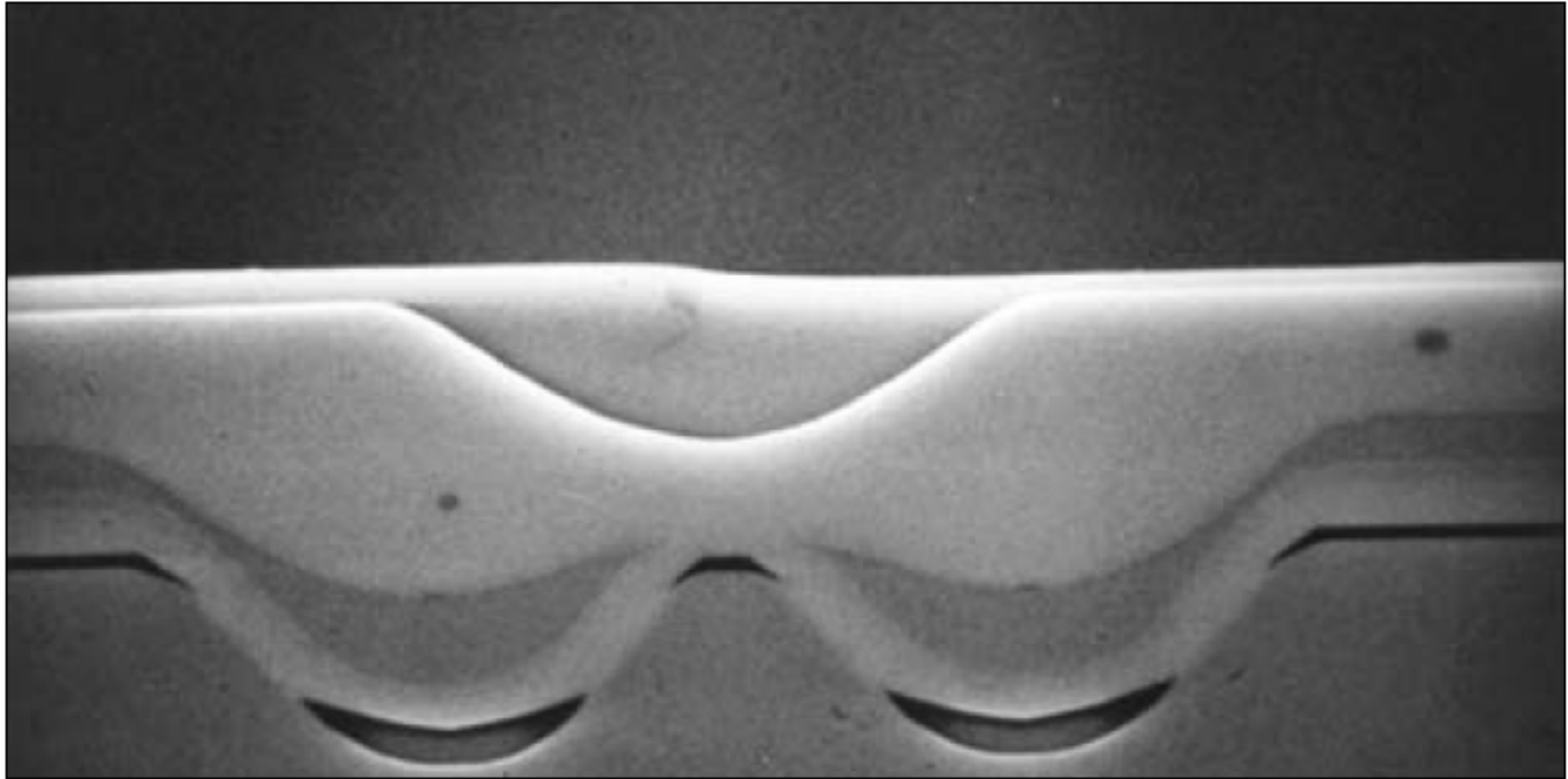
n InP puffer réteg 0,5-1,5 μm

n⁺ InP hordozó

n InP záró réteg 0,5-1 μm

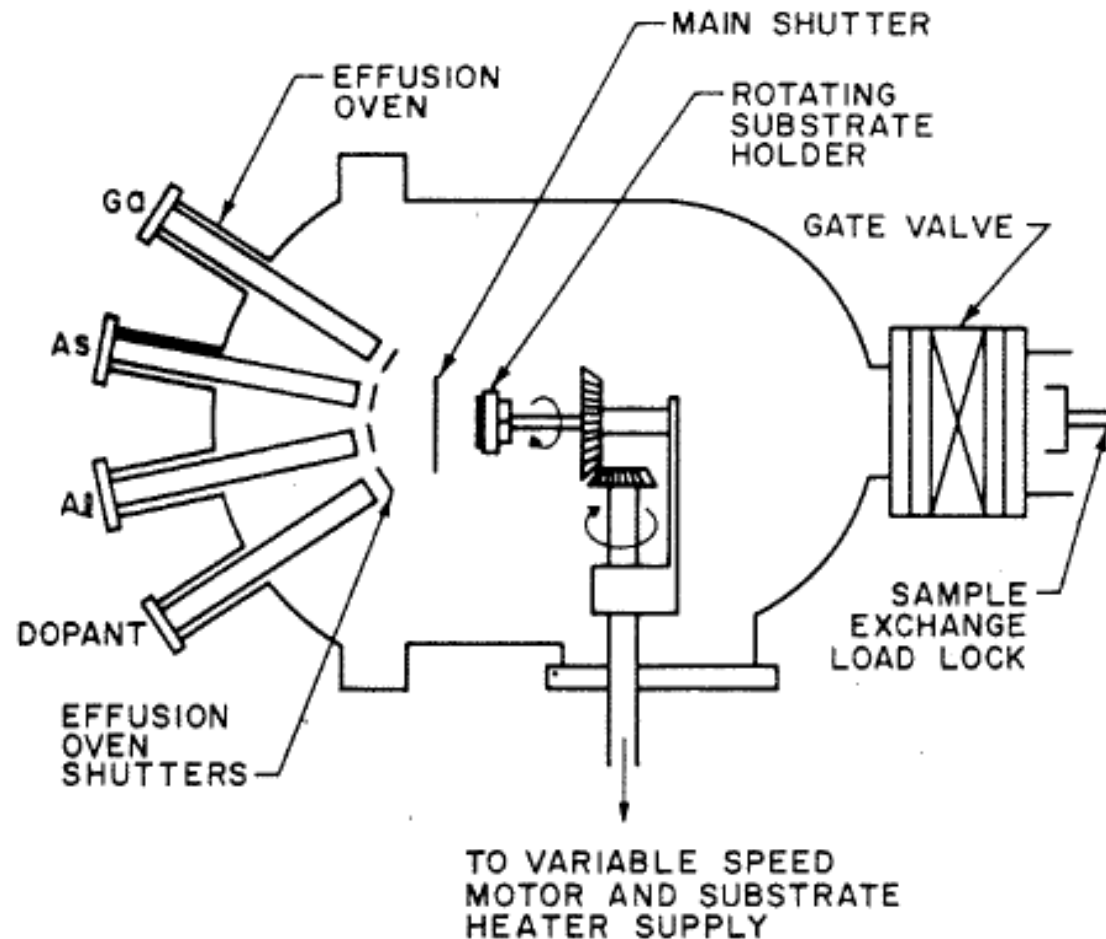
p InP határoló réteg 0,5-1 μm

Folyadékfázisú epitaxiával növesztett lézerszerkezet - pásztázó elektronmikroszkópos felvétel



Molekulasugaras epitaxia

A molekulasugaras epitaxiás rétegnövesztés a vákuumgőzölés különleges esete. A berendezés munkakamrájában az egyes elemeket külön-külön forrásban (Knudsen cella vagy effúziós cella) gőzölik el, egyensúlyi körülmények között. Így az egyes elemek gőzölésének sebességét - a létrehozandó réteg összetételét - nagyon pontosan lehet szabályozni.



Molekulasugaras epitaxia

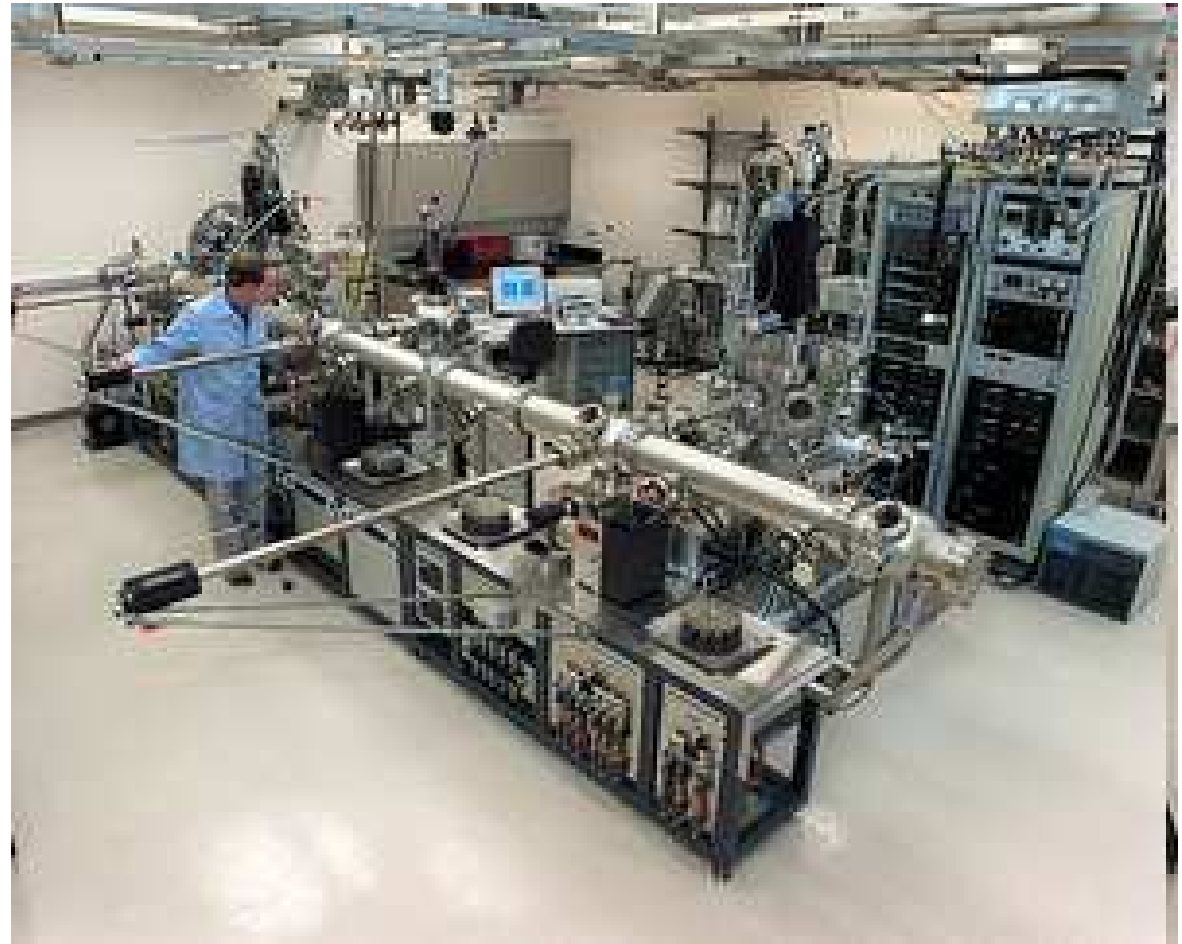
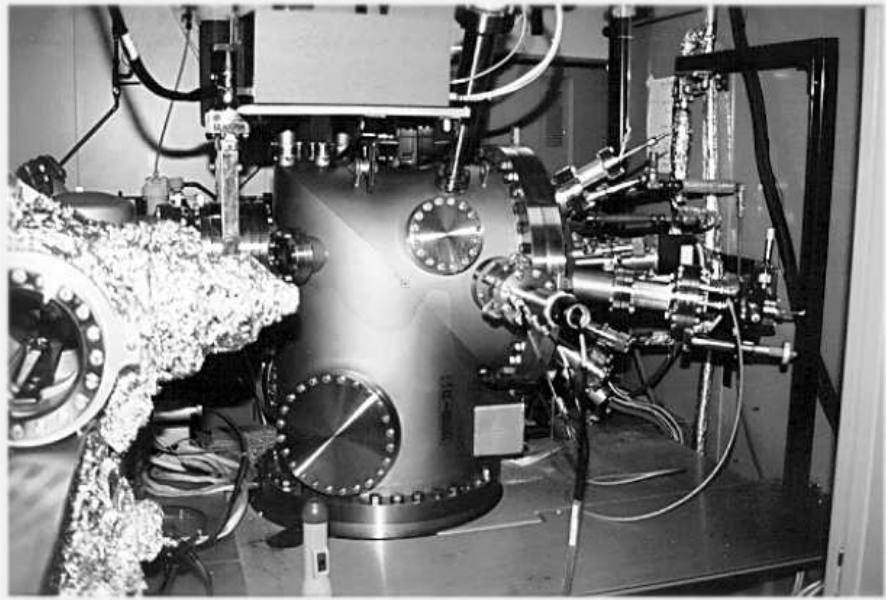
A Knudsen cellákat folyékony nitrogénnel hűtött panelek veszik körül (szennyezők távoltartása, vákuum javítása). A molekulasugarat takarólemezzel (*shutter*) lehet megszakítani. A réteg kialakulását többnyire nagyenergiájú elektrondiffrakcióval (reflexió) követik (RHEED). A hordozót általában néhány száz °C-on tartják.

A rétegnövekedési sebesség viszonylag lassú, általában egy monoretég/sec. A gőzölés UHV-ben, 5×10^{-9} mbar-nál jobb, olajmentes vákuumban történik. A MBE berendezések lényeges eleme az adagoló rendszer (zsilip), mely a hordozók elkőkészítését és cseréjét teszi lehetővé a vákuum lerontása nélkül.

Jellemzők:

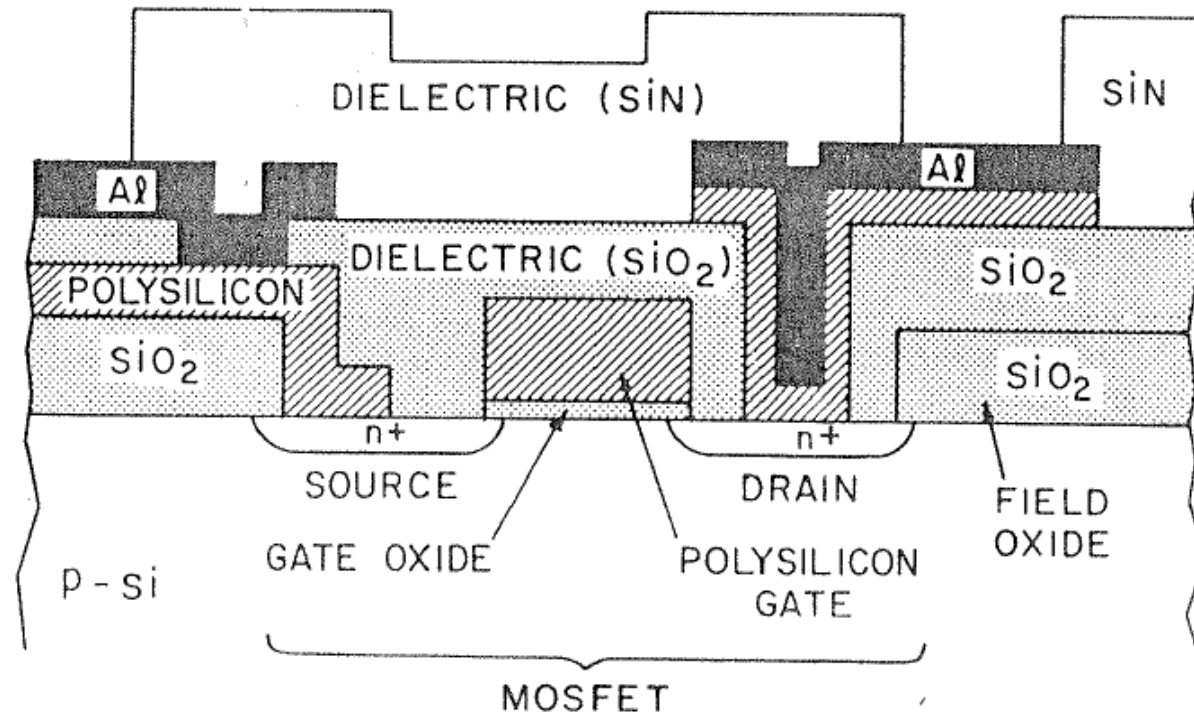
- az összetétel, a növekedési sebesség és a rétegvastagság nagyon pontosan beállítható
- nagyon vékony, egyatomos rétegek is növeszthetők,
- "tiszt" eljárás, mivel ultranagy vákuumban történik,
- a rétegekialakulás folyamatosan követhető,
- nagyon éles átmenettel rendelkező heteroszerkezetek készítésére használható,
- tömeggyártásra alkalmas.

MBE kamra és reaktor



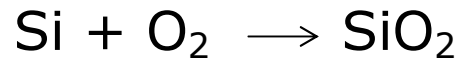
A szilícium termikus oxidációja

A MOSFET szerkezete

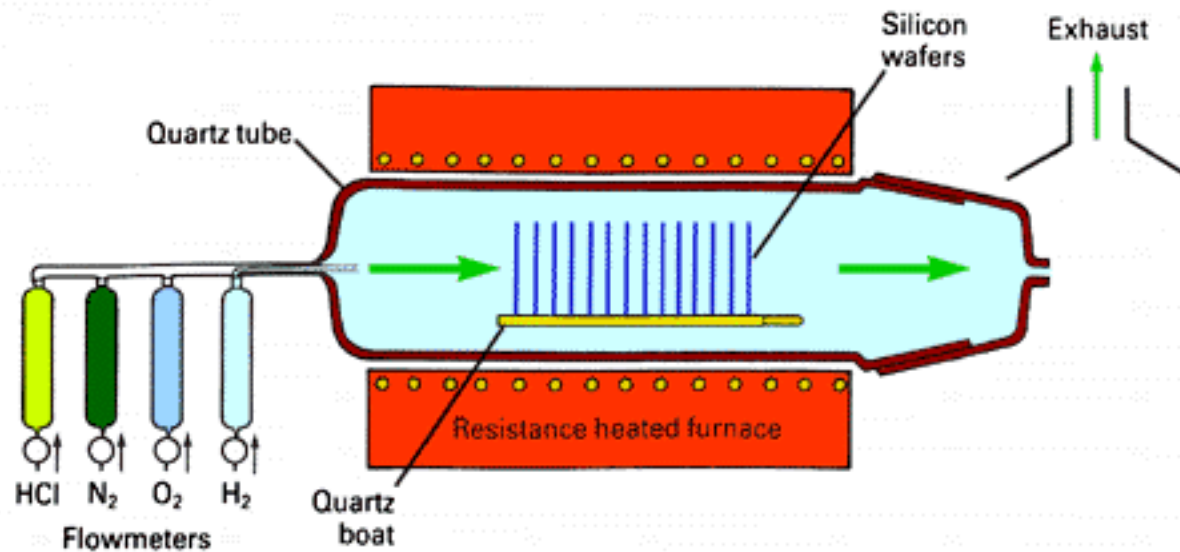
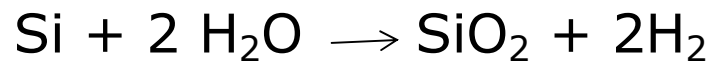


Oxidnövesztés

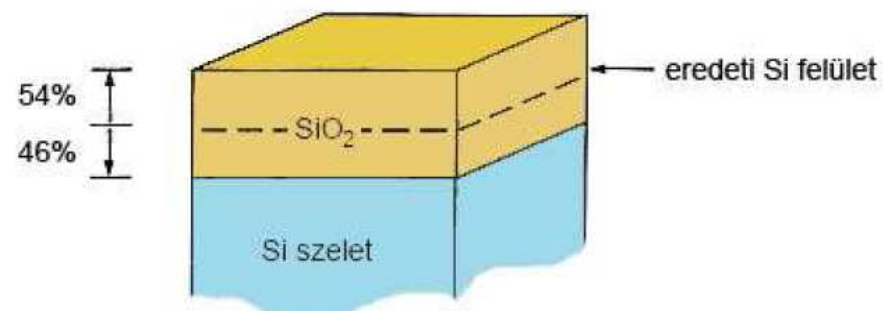
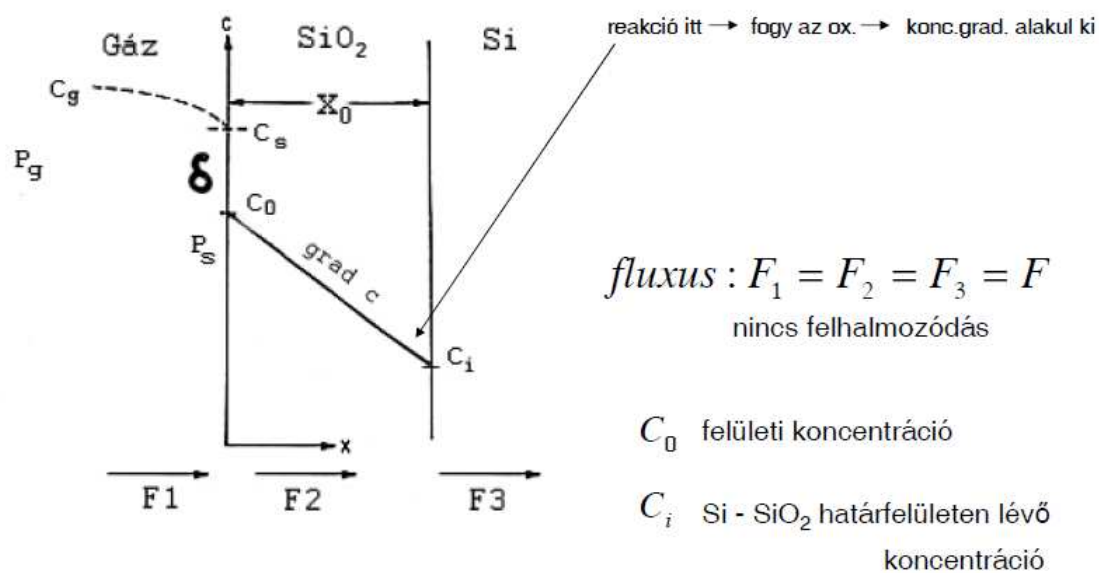
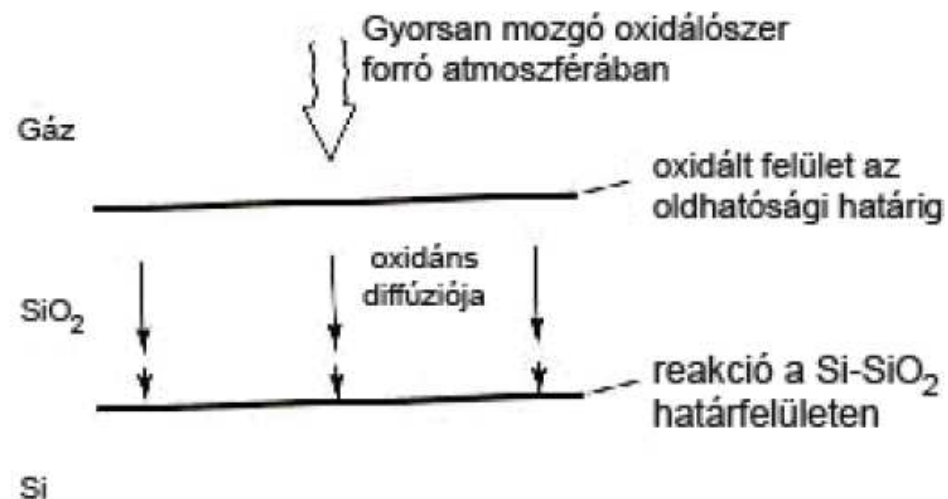
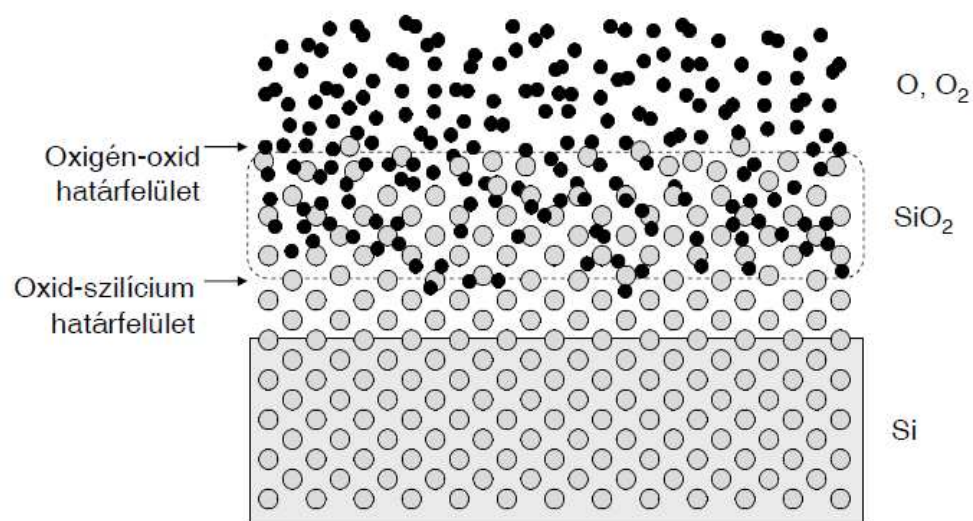
Száraz oxidáció oxigén atmoszférában:



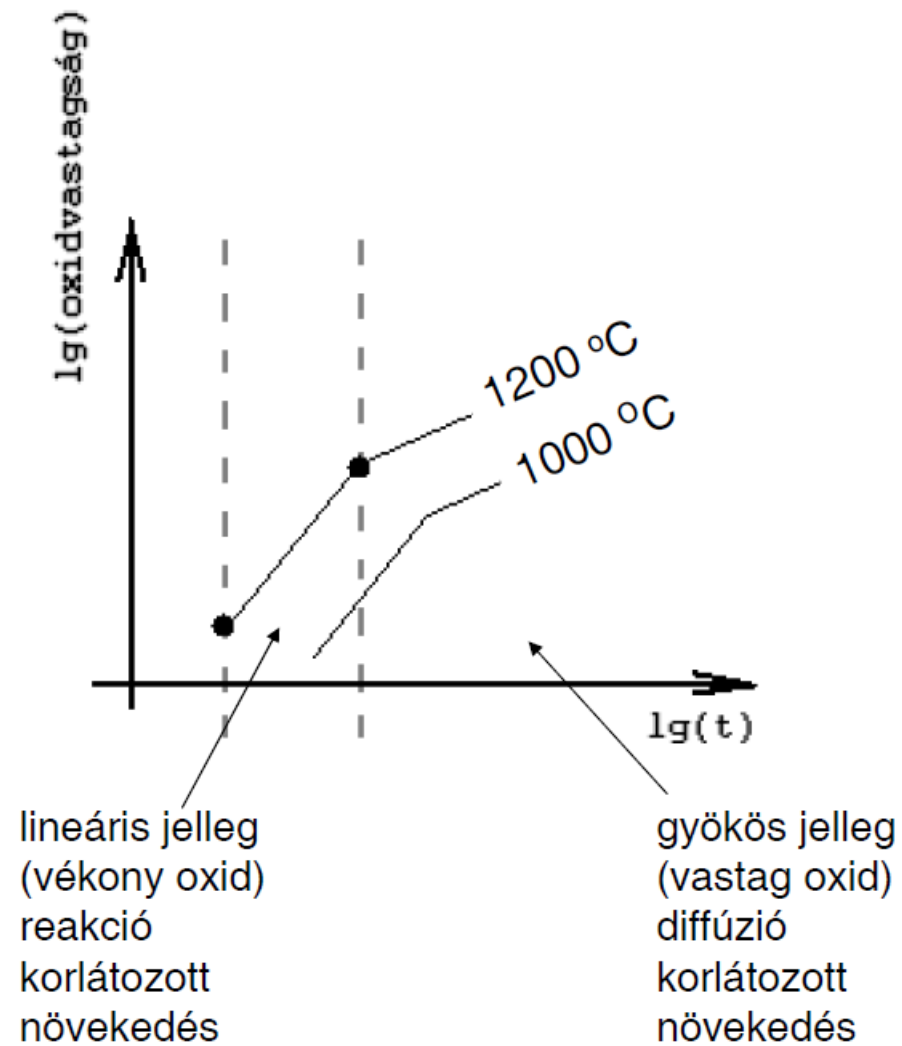
Nedves oxidáció vízgőzben:



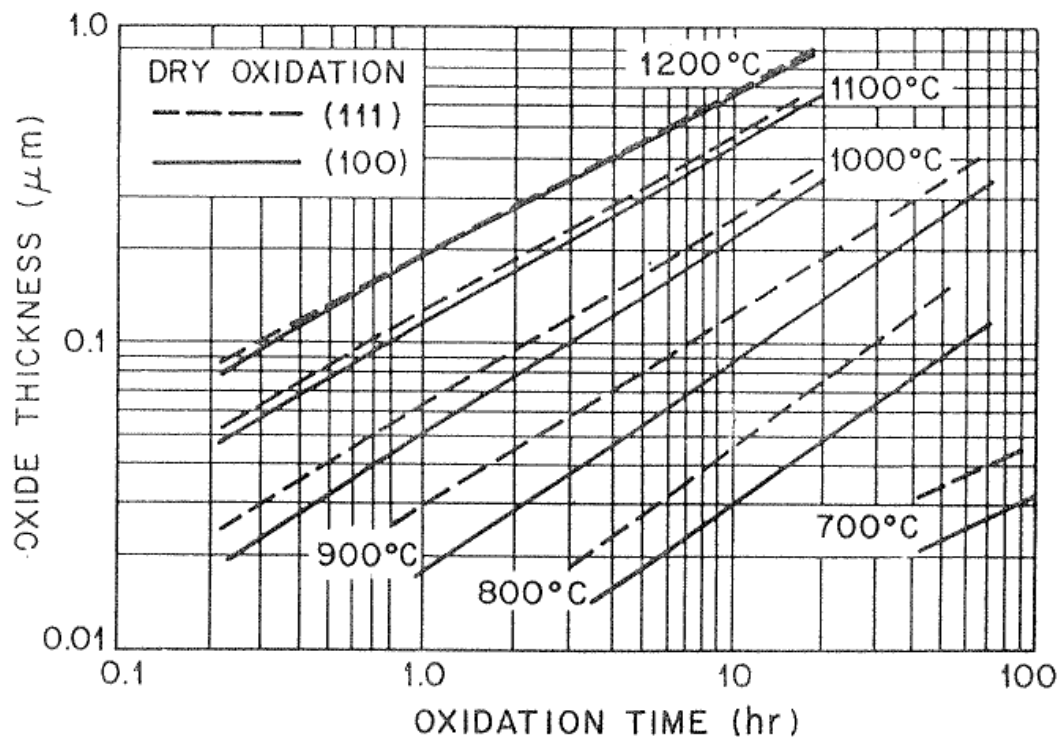
A növesztés folyamata



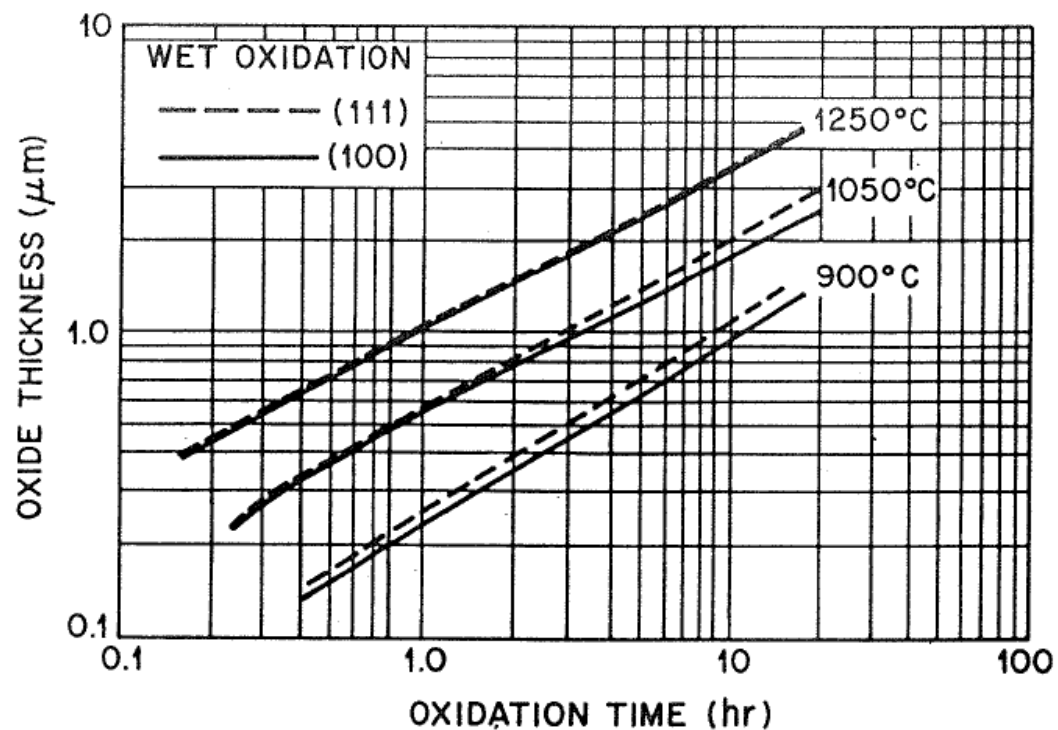
A növesztés mechanizmusa



Oxidvastagság – növesztési idő



Száraz oxid



Nedves oxid

Nativ oxid

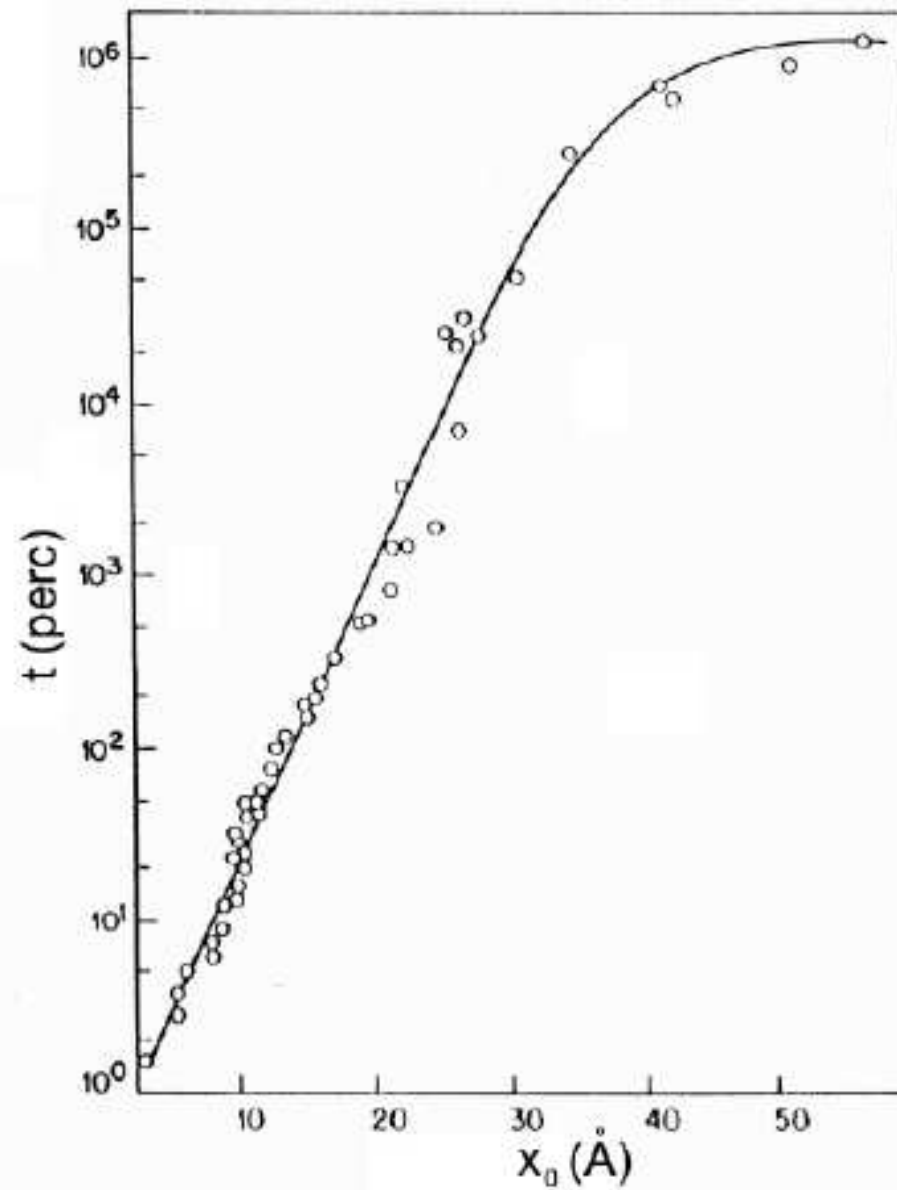
1 év

1 hét

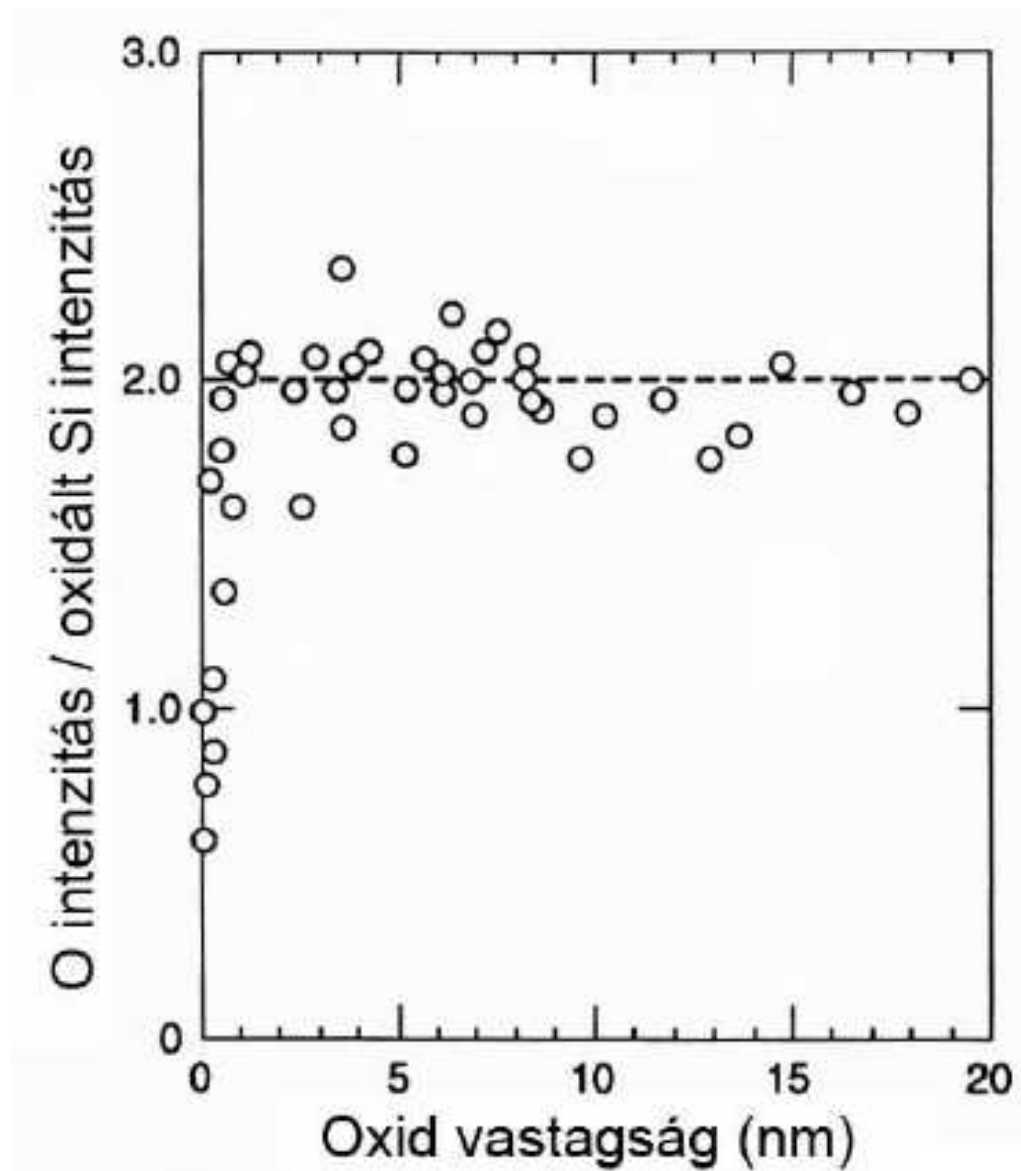
1 nap

1 óra

1 perc

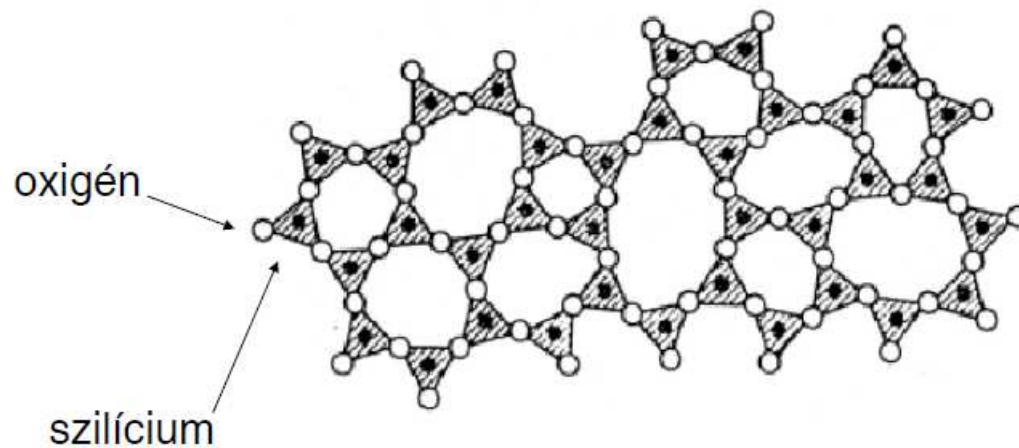
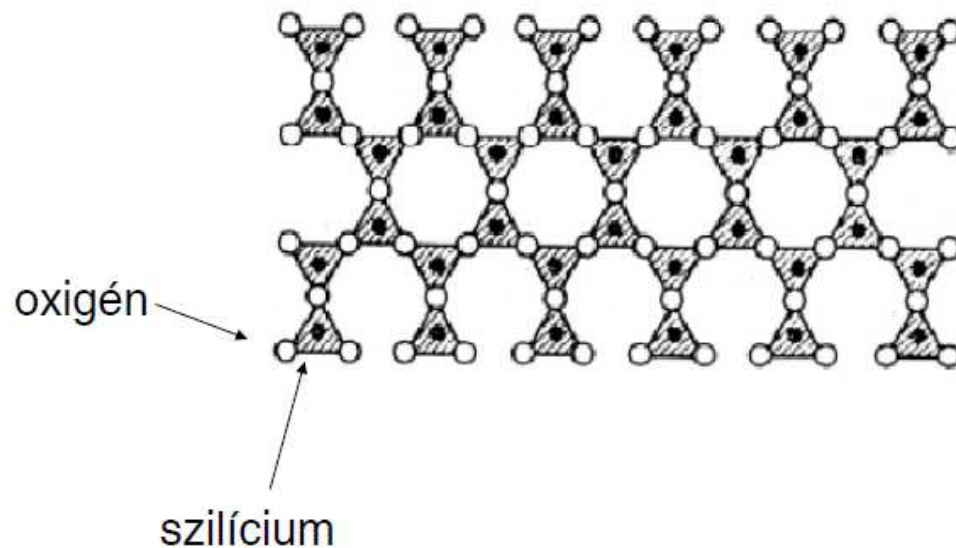
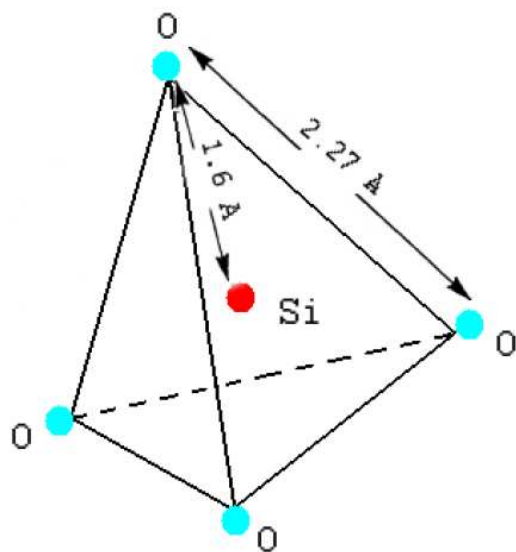


Sztöchiometria



A SiO_2 szerkezete

Kristályos vagy amorf



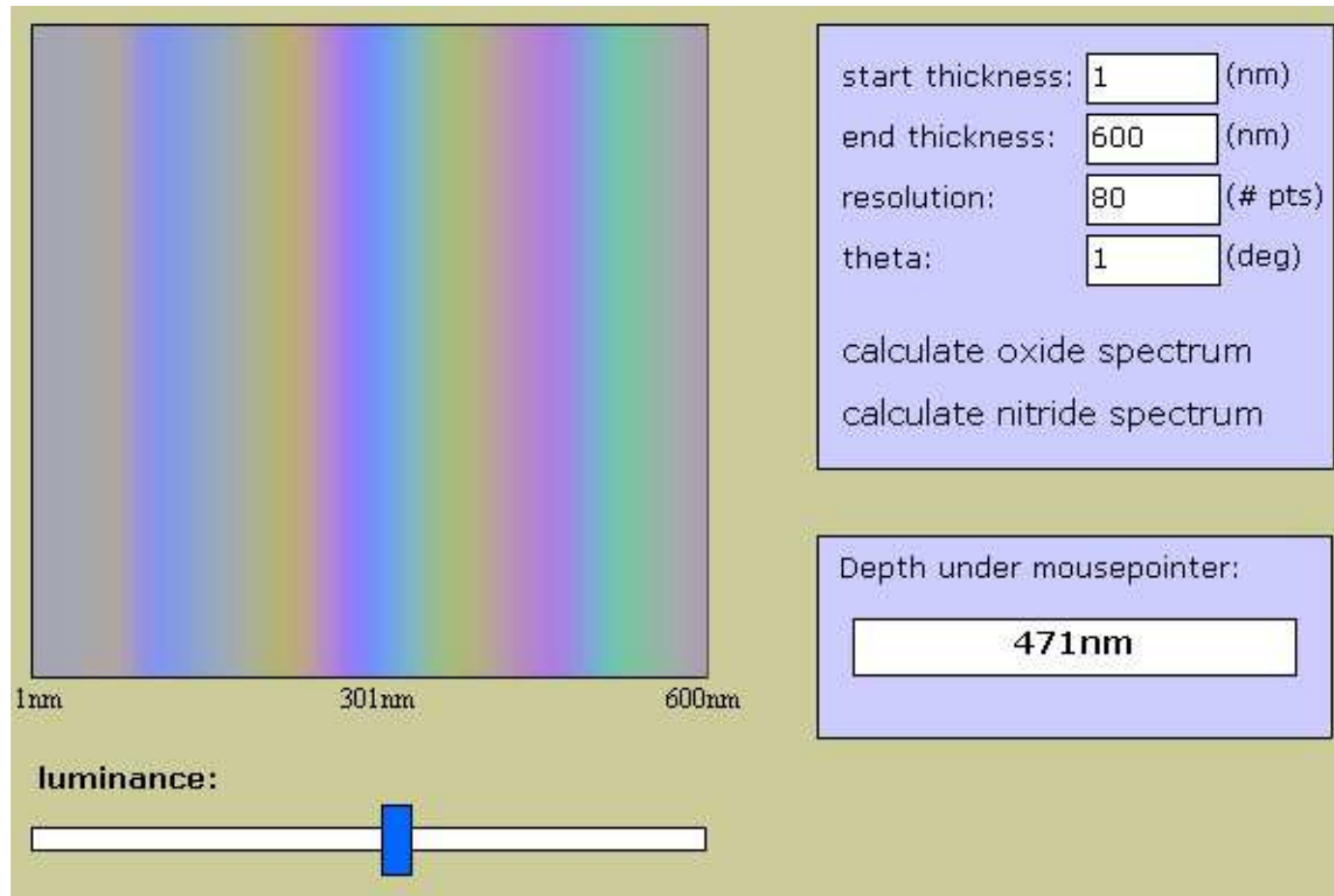
Oxidnövesztés a gyakorlatban



Oxidnövesztés a gyakorlatban



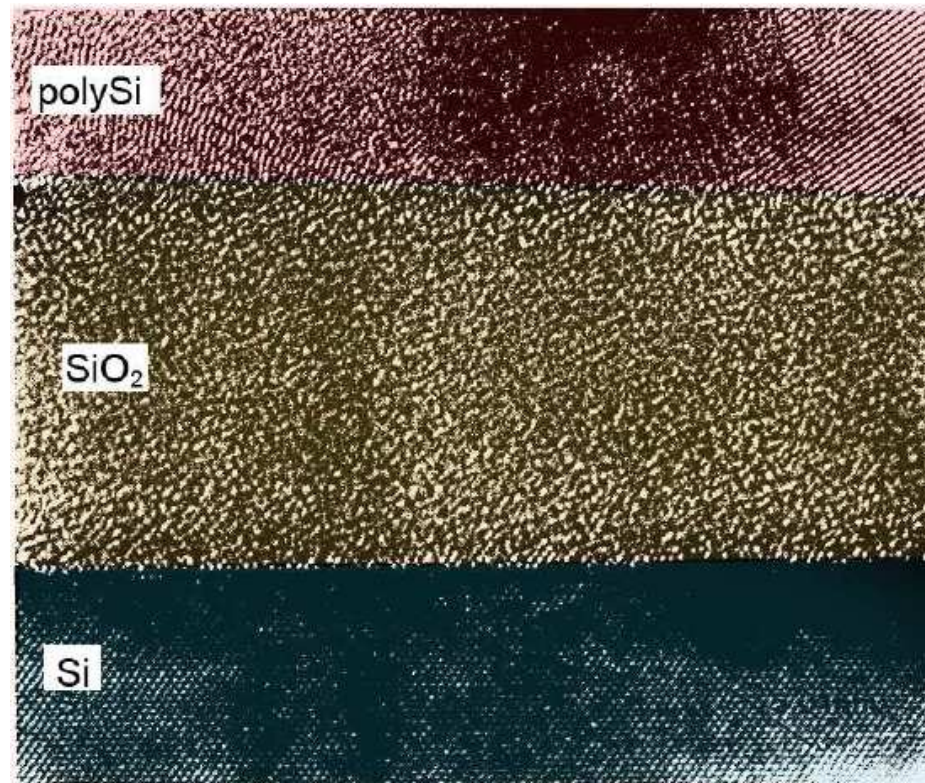
Vastagság színskála



Alkalmazás

Szigetelés, felületpassziválás (élettartam), diffúziós és implantációs maszk, *gate oxid*.

Szilíciumon a hordozó termikus oxidációjával állítható elő a legjobb szigetelő/félvezető (Si/SiO₂) határfelület. A határfelületi állapotsűrűség elegendően alacsony (kisebb, mint 10^{10} cm^{-2}) az inverziós csatorna kialakulásához. Ezért a szilícium az egyetlen félvezető, amelyen jóminőségű MOSFET-et elő lehet állítani.



Ellenőrző kérdések

Milyen kémiai reakciók játszódnak le folyadékfázisú epitaxia esetén?

Mi az epitaxia?

Mire használják az epitaxiát?

Mi az effúziós cella?

Mi a különbség a homo- és a heteroepitaxia között?

Hol játszódik le a reakció gőzfázisú epitaxiánál?

Mire használják a fémrétegeket az IC-kben?

Mire használják a szigetelő rétegeket az IC-kben?

Mi a különbség a száraz és nedves oxidáció között?

Hol megy végbe a reakció a szilícium oxidációjakor?

Mi a nativ oxid?

Miért csak szilíciumon lehet jó minőségű MOSFET-et előállítani?

Mire használják a szilicideket a félvezető áramkörökben?

Milyen közegben növesztik a termikus szilícium-dioxidot?