

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA



**5 FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK
GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA**

**5-02 RÉTEGLEVÁLASZTÁSI ÉS
ADALÉKOLÁSI TECHNOLÓGIÁK**

ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA ÉS ANYAGISMERET

VIETAB00

A háttérszín jelentése: IMSc anyag

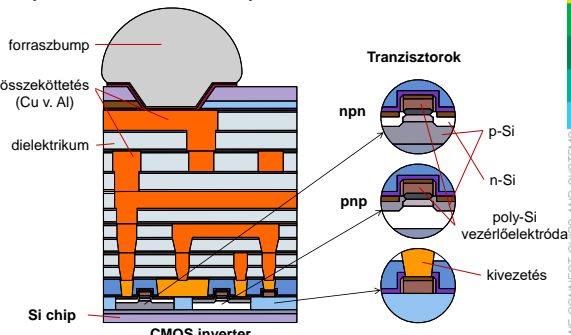
 **BMEETT**
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

1

**EGY MODERN IC SZERKEZETE
(KERESZTMETSZET)**



forraszbump

összeköttetés (Cu v. Al)

dielektrikum

Si chip

CMOS inverter

Tranzisztorok

nnp

pnp

p-Si

n-Si

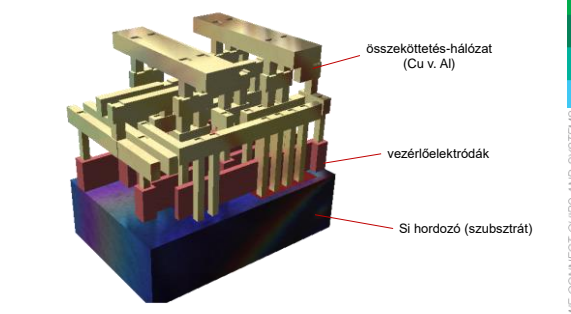
poly-Si vezérlőelektróda

kivezetés

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

2

EGY MODERN IC SZERKEZETE (3D)



összeköttetés-hálózat (Cu v. Al)

vezérlőelektródák

Si hordozó (szubsztrát)

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

3

INTEGRÁLT ÁRAMKÖRÖK TECHNOLÓGIÁJA

„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 passzíváló réteg
- Polikristályos Si – kapuelektrodák
- Fém vezetékezés és kontaktusok (Cu v. Al)
- PSG (foszfoszilikát üveg) a fém vezetékezés rétegek között

4

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 átvezetések.
 - Speciális eset: epitaxia – egykristályos réteg előállítása egykristályos rétegen

5

PVD – FIZIKAI GŐZFÁZISÚ LEVÁLASZTÁS

- A réteg anyagát (anyagait) energia-befektetéssel gőz vagy gáz fázisba visszük, ami kondenzálódik a hordozón (pl. Si chipre Al fémezése).
 - Két alapvető típusa van:
 - vákuumpárolgatás,
 - vákuumporlasztás.(Részletesebben l.: Vékonyrétegek technológiája.)
- Fontos! A CVD-vel ellentétben nincs a felületen kémiai reakció, ezért maga az elv is egyszerűbb.

6

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 (kártévőrtás)

B_2H_4 (diborán) – P adalékolás

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



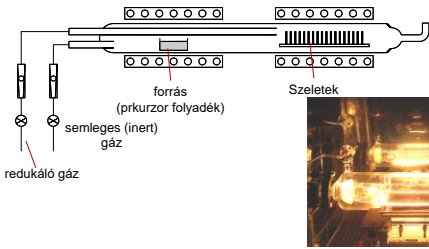
Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

7/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

7

A CVD REAKTOR SZERKEZETE



LPCVD: low pressure CVD (alacsony nyomású CVD)

PECVD: plasma enhanced CVD (plazmakisülés közbeni CVD)



Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

8/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

8

CVD-VEL LEVÁLASZTHATÓ ANYAGOK A
FÉLVEZETŐ TECHNOLÓGIÁBAN (példák)

- Egykristály hordozót folytató Si réteg, epitaxia (szilán prekursor bontása)
 $\text{SiH}_4 \text{ (szilán, g)} \rightarrow \text{Si (s)} + 2 \text{H}_2 \text{ (g)} \text{ (1000 °C)}$
- Egykristályos v. polikristályos Si – epitaxia, kapuelektroda (Si-tetraklorid)
 $\text{SiCl}_4 \text{ (g)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{Si (s)} + 4\text{HCl (g)} \text{ (800-1200 °C)}$
(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)
 $3 \text{SiH}_4 \text{ (g)} + 4 \text{NH}_3 \text{ (g)} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 \text{ (s)} + 12 \text{H}_2 \text{ (g)}$



Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

9/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

9

CVD – KÉMIAI GŐZFÁZISÚ LEVÁLASZTÁS TÍPUSAI

- APCVD – atmoszférikus nyomású CVD: **(+)** Gyors, egyszerű, nagy kihozatal, **(-)** Kevésbé 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



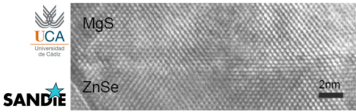
Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák

10/32


10

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



Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

11/32

11

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, lézerdiodák, 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)



Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

12/32

12

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):
 $\text{SiCl}_4(\text{g}) + 2\text{H}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{Si}(\text{s}) + 4\text{HCl}(\text{g})$
Vagy szilícium triklór-szilánból:
 $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$

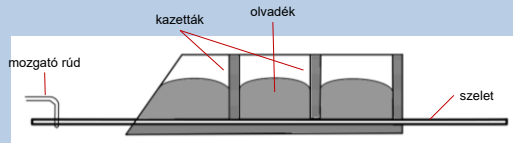
Ebben a reakcióban a szilícium-tetraklorid és a hidrogén mennyiségének a szabályozásával változtatható a növekedési sebesség.
Kb. 2 µm/min növekedési sebesség felett polikristályos, azalatt epitaxiás réteg nő.



WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

13

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



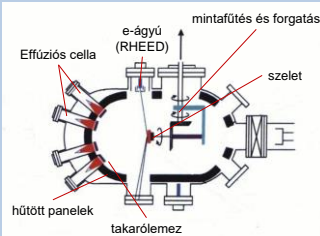
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

14

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA

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

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



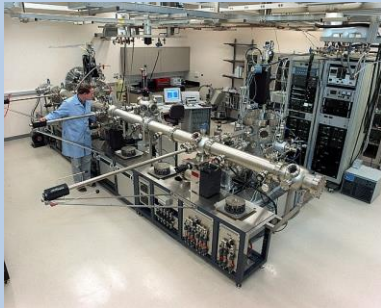
Az effúziós (gőzforrás) cellákat cseppfolyós N₂-el hűtött panelek veszik körül (szennyezők távoltartása, vákuum javítása). A molekulasugarat takarólemezzel (shutter) lehet megszakítani. A réteg kialakulását nagyenergiájú elektrondiffrakcióval (reflexiós) követik (RHEED). A szubsztátot általában néhány száz °C-on tartják.



WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

15

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA



BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

16/32

16

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS:
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.

BMEETT

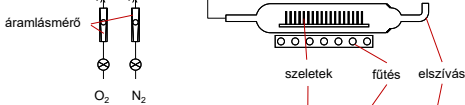
Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

17/32

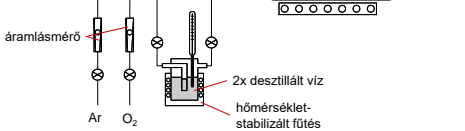
17

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS:
OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

Száraz oxidáció:



Nedves oxidáció:



BMEETT

Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák


18/32

18

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS:
OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA

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

	PECVD	SiH ₄ + O ₂ (CVD)	Si(OEt) ₄ (CVD)	SiCl ₃ H ₂ + N ₂ O (CVD)	Termikus oxidáció
Hőmérséklet (°C)	200	450	700	900	1000
Összetétel	SiO _{1,9} (H)	SiO ₂ (H)	SiO ₂	SiO ₂ (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

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

19/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

19


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).

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

20/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

20


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)]

BMEETT

Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák

21/32

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

21

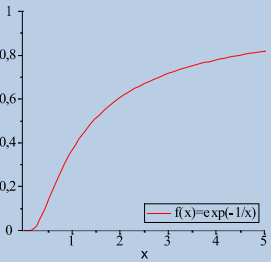
A DIFFÚZIÓ FÜGGÉSE A HŐMÉRSÉKLETTŐL

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]

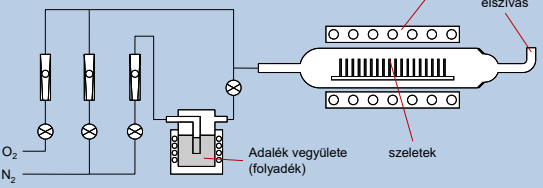
A függvény a végtelenben D_0 -hoz konvergál. Az x a H/k -ra normált hőmérséklet.
(az ábrán $D_0=1$)



BMEETT Rétegleválasztási és adalékolási technológiák 22/32

22

A DIFFÚZIÓS KÁLYHA VÁZLATA



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

BMEETT Rétegleválasztási és adalékolási technológiák 23/32

23

A DIFFÚZIÓ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

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

- felületi koncentráció állandó, akkor

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

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

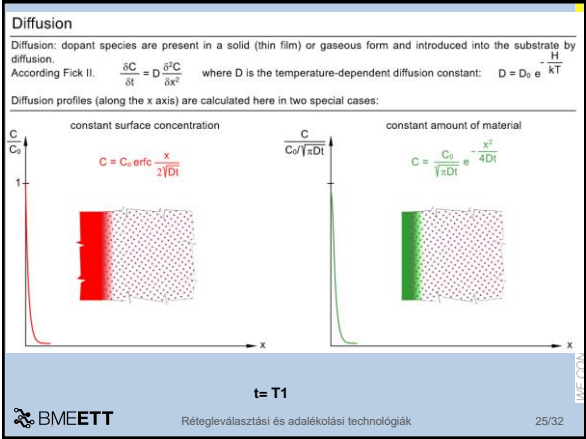
- Adott mennyiségű anyag (pl.: vékonyréteg a felületen) , akkor

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

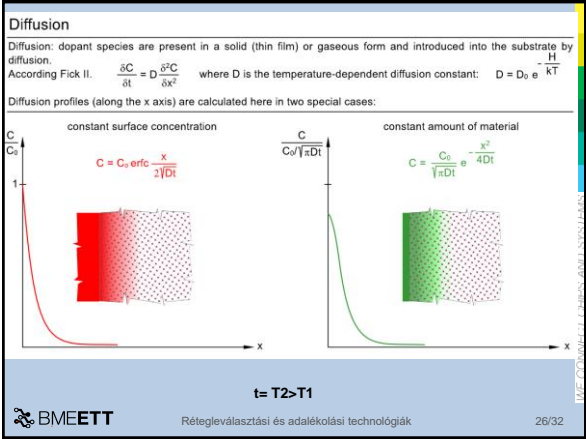
BMEETT Rétegleválasztási és adalékolási technológiák 24/32

24

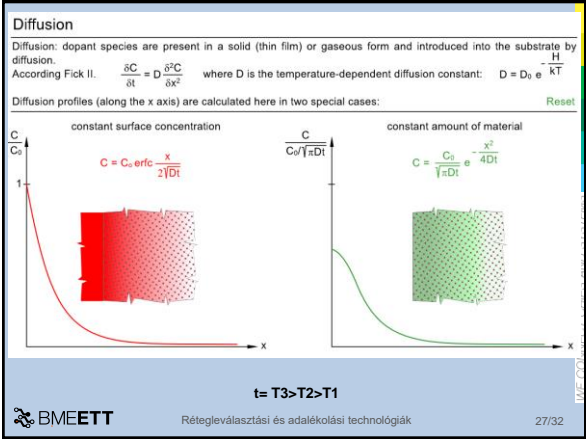
FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA



25



26



27

AZ (ION)IMPLANTÁCIÓ

Az ionimplantáció során az adalék ionját elektromos térerővel (20-300kV) felgyorsítva mágneses tömegszeparátoron át a szelet felületébe lövik. A szelet hőmérséklete alacsony maradhat (<300°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.

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

28/32

28

(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

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

29/32

29

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.

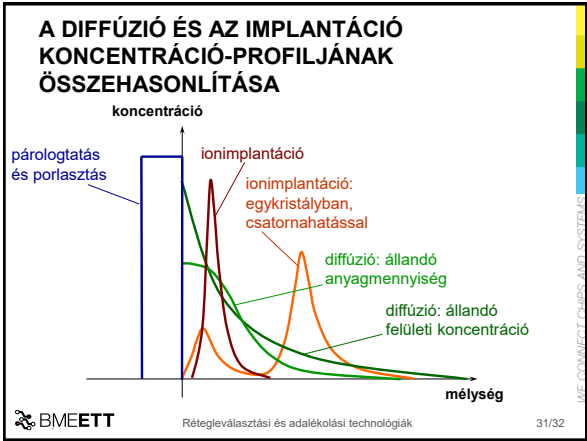
Csatornahatás: megfelelő orientációjú kristályban csatorna alakul ki, amely „vezeti” az adalékokat. Ez általában nem kívánatos, ezért szándékosan félreorientálják néhány fokkal.

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

30/32

30



31

TARTALOMJEGYZÉK

- Nyers Si szeletről kiindulva az eszközökig
 - Rétegleválasztás
 - Vezetési tulajdonságok megváltoztatása (adalékolás)
 - Mintázat- és szerkezetkialakítás (következő előadás)
- Rétegleválasztási eljárások célja, eljárásai
 - PVD (Physical vapour deposition): fizikai gőzfázisú leválasztás,
 - CVD (Chemical vapour deposition): kémiai gőzfázisú leválasztás
 - Speciális eset: epitaxia – egykristály réteg növesztése egykristályra
- Adalékolás – diffúzió és implantáció

BMEETT

Rétegleválasztási és adalékolási technológiák

32/32

32
