

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA


MŰEGYETEM 1782

2 FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

2-04 RÉTEGLEVÁLASZTÁSI, ÉS ADALÉKOLÁSI TECHNOLÓGIÁK

ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA ÉS ANYAGISMERET
VIETAB00


 BMEETT
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANTÁRSZÉK

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

TARTALOM

- Nyers Si szeletről kiindulva az eszközig
 - 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
 - LPE (Liquid-phase epitaxy)
 - VPE (Vapour-phase epitaxy)
 - MBE (Molecular beam epitaxy)
- Adalékolás – diffúzió és implantáció

 BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 2/30

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

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

 BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 3/30

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

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:
 - vákuumpárolgatás,
 - vákuumporlasztás.Részletesebben a Vékonyrétegek technológiája előadásban tárgyaljuk.
- 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 (l. 2.3. előadás, Si leválasztása)
 - A kiindulási anyagok (gázok) gyakran veszélyesek (robbanásveszély, mérgező, stb.)
- A kiindulási anyagok összefoglaló neve: **prekurzor** gázok.
- Példa prekursor gázokra:
- Si: SiH_4 (szilán) – gyúlékony, mérgező
- P: PH_3 (foszfin) – gyúlékony, mérgező (kártevőirtás)
- B: B_2H_4 (diborán) - gyúlékony, mérgező
- A reakciót úgy kell megválasztani, hogy a keletkező melléktermékek ne képezzenek csapadékot és ne támadják meg a szeletet

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 fémezések (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

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

A CVD REAKTOR SZERKEZETE

redukáló gáz semleges (inert) gáz

forrás (folyadék) Szeletek

A folyadék állapotban lévő prekuzort fellemegetjük a forráspontjáig. A szeleteket olyan hőmérsékletre hevítjük, ahol a CVD kémiai folyamata lejátszódik.

Ez a két hőmérséklet különböző, így kétfázisű fűtés szükséges.

Növesztés alatti adalékolás lehetséges az adalék prekuzorainak felhasználásával.

BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 7/30

A CVD REAKTOR SZERKEZETE

MOCVD berendezés Típusos CVD reaktor

<http://www.nanolab.uc.edu/equipment/MOCVD/MOCVD.htm>

BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 8/30

CVD-VEL LEVÁLASZTHATÓ ANYAGOK A FÉLVEZETŐ TECHNOLÓGIÁBAN

- Réz – a fémmezések, chipen belüli vezetékvezés (modern) anyaga: MOCVD módszerrel, leggyakoribb prekuzor: (hfac)Cu(TMVS) – CupraSelect® (márkanév) ez egy fémorganikus réz tartalmú szerves vegyület, szobahőmérsékleten folyadék

hfac: hexafluoro-acetil-aceton

TMVS: trimetil-vinil-szilán

CC(F)(F)C(=O)OC(F)(F)F (hfac)

C=C[Si](C)C (TMVS)

$2 \text{ (hfac)Cu(TMVS)} \xrightarrow{250 \text{ }^\circ\text{C}} \text{Cu} + \text{Cu(hfac)}_2 + 2 \text{ TMVS}$

(Megj.: Vákuumpárolgatott alumínium vezetékvezést is használhatunk „klasszikus” félvezető chipen esetében)

BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 9/30

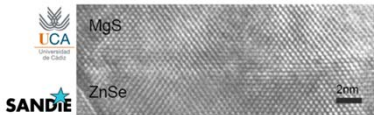
FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

CVD-VEL LEVÁLASZTHATÓ ANYAGOK A FÉLVEZETŐ TECHNOLÓGIÁBAN

- PSG (foszfoszilikát üveg), BSG (boroszilikát üveg) és BPSG (bór-foszfoszilikát üveg) – vezetékezők közötti dielektrikum
Prekursor a BSG esetében lehet pl.:
$$\text{SiH}_4 \text{ (szilán)} + \text{B}_2\text{H}_6 \text{ (diborán)} + \text{O}_2 \rightarrow x \text{ SiO}_2 + y \text{ B}_2\text{O}_3$$
- SiO_2 (szilícium-oxid) – dielektrikum, a kapuelektroda esetében használatos.
TEOS: tetraetil-ortoszilikát reakciója 600 °C-on, dietil-éter képződése mellett
$$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$$
- Si_3N_4 – szigetelő réteg (SiO_2 -hoz képest jobban véd a víz molekuláktól és Na ionoktól) PECVD-vel (szilán és ammónia keverékből)
$$3 \text{ SiH}_4(\text{g}) + 4 \text{ NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4(\text{s}) + 12 \text{ H}_2(\text{g})$$
- polikristályos szilícium – kapuelektroda, szilánból vagy triklór-szilánból
$$\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$$

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

- A **homoepitaxia**: a felvitt réteg ugyanolyan anyagú, mint a hordozó. Az egykristályos réteg ideális esetben tökéletes, hibahelymentes folytatása a hordozónak.

Célszerű alkalmazása: eltérő adalékoltságú réteg növesztése a hordozóra. A lépcsős adalékoltsági profil legjobban homoepitaxiával lehet elérni.

- A **heteroepitaxia**: olyan epitaxia, ahol a hordozó és a felvitt réteg kémiai összetétele különböző. Lényeges, hogy a rácsállandóban nem lehet nagy különbség.

Alkalmazása: vegyülettérfelvezető rétegrendszerek elsősorban fotonikai célra (kék, UV lézer, lézertűdők, függőleges üregű lézerek)

Pl.:

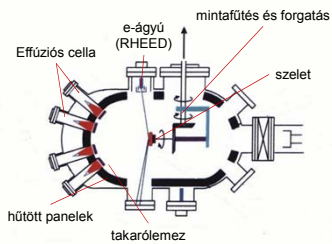
- GaN (gallium-nitrid) zafír hordozón, vagy AlGaInP (alumínium-gallium-indium-foszfid) GaAs szubsztráton.
- SOS – silicon-on-sapphire: szilícium zafír felületen pl. szenzorokban.

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA

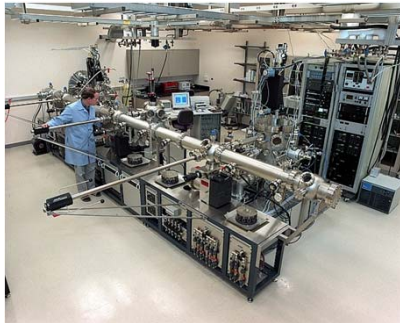
Lassan párolgó vagy szublimáló forrásból irányított sugárban viszünk anyagot a hordozóra.

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

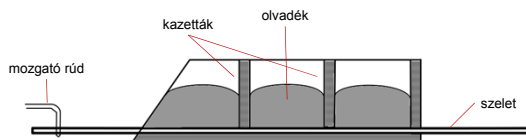


A effúziós (gőzforrás) cellákat cseppfolyós N_2 -el hűtött panelek veszik körül (szennyezők távoltartása, vákuum javítása). A molekulasugarat takarólemezzel (*shutter*) lehet megszakítani. A réteg kialakulását nagyenergiájú elektrondifrakcióval (reflexió) követik (RHEED). A szubsztrátot általában néhány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

MBE – MOLEKULASUGARAS EPITAXIA



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 előállítására

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

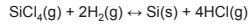
VPE – GŐZFÁZISÚ EPITAXIA

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

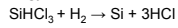
Az epitaxiás növekedés sebessége nagyban függ a gázösszetételtől.

Pl.: Si növesztése VPE-vel

Szilícium-tetrakloridból és hidrogénből, 1200 °C-on:



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.

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: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$

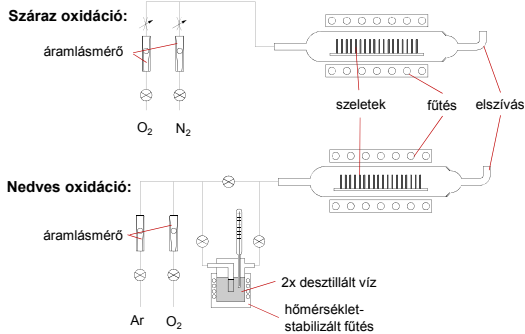
Pl.: 1000 °C-on 7 nm SiO₂ 15 perc alatt nő (kapuelektroda).

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.

FONTOS RÉTEGNÖVESZTÉS: OXIDRÉTEG NÖVESZTÉSE SZILÍCIUMRA



FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

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 ₂ 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

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/modelléssel 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.

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

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

c : koncentráció [mol/m³]

D : diffúziós állandó [m²/s]

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

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

A DIFFÚZIÓ FÜGGÉSE A HŐMÉRSÉKLETTŐL

A D diffúziós együttható csak a hőmérséklettől függ:

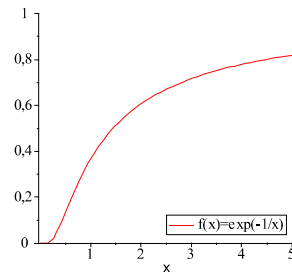
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{H}{kT}\right)$$

H : aktivációs energia [J]

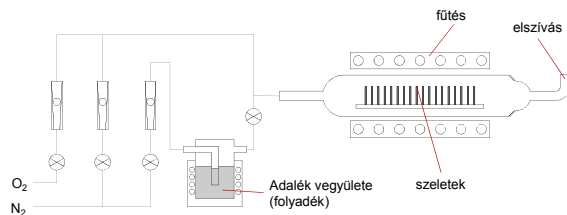
k : Boltzmann-állandó
 $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]

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!

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

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

FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

A DIFFÚZIÓ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

Konstans felületi koncentráció:

Vékonyréteg „behajtása”
(konstans anyagmennyiség):

BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 25/30

AZ (ION)IMPLANTÁCIÓ

Az ionimplantáció során az adalék ionját egy gyorsító elektromos térerővel a felületbe lövik.

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

BMEETT Rétegleválasztási, és adalékolási technológiák 26/30

(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 27/30

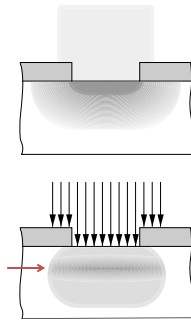
FÉLVEZETŐ ALAPÚ ESZKÖZÖK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

A DIFFÚZIÓ ÉS AZ IMPLANTÁCIÓ KONCENTRÁCIÓ-PROFILJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

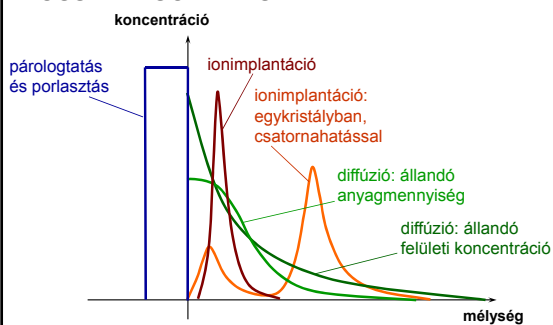
Diffúzió esetében:
A legnagyobb koncentráció a felületen alakul ki.

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 ÖSSZEHASONLÍTÁSA



ÖSSZEFOGLALÁS

- Megismertük a következő technológiákat:
 - rétegnövesztés epitaxiával,
 - homoepitaxiával,
 - heteroepitaxiával.
 - szilícium oxidációja, melynek következtében SiO_2 réteg alakul ki,
 - adalékolás
 - diffúzióval,
 - ionimplantációval.
- A következő előadásban az ilyen rétegek mintázása, és az adalékolás előtti maszkolás kerül tárgyalásra.
