



Tehnologije mikrosistema

Prof. dr Biljana Pešić

Prof. dr Dragan Pantić



Formiranje tankih filmova

- **Rast filmova**
 - Formiranje tankog filma **iz** materijala supstrata
 - Primer: formiranje SiO_2 termičkom oksidacijom
- **Depozicija filmova**
 - Nanošenje tankog filma **na** materijal supstrata
 - Primer: formiranje SiO_2 procesom CVD



Procesi rasta filmova

- **Oksidacija**
 - Termička oksidacija
 - Anodizacija

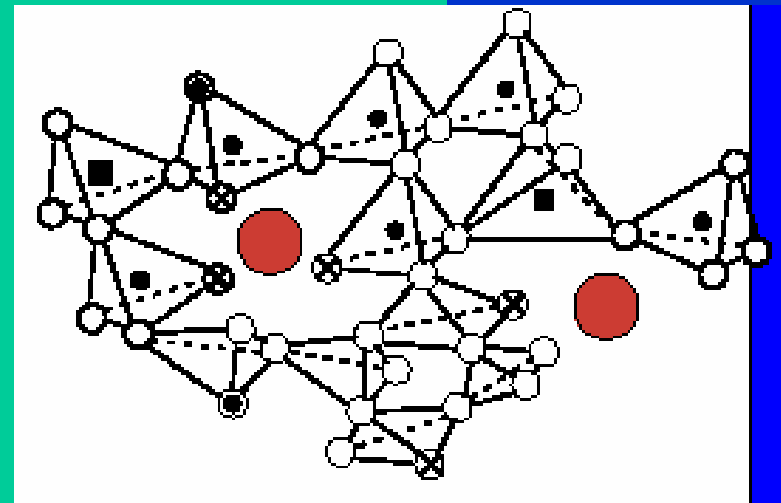
Procesi depozicije filmova

- **CVD - Hemijska depozicija iz gasovite faze**
 - APCVD (Atmospheric Pressure CVD)
 - LPCVD (Low Pressure CVD)
 - PECVD (Plasma Enhanced CVD)
- **PVD – Fizička depozicija iz gasovite faze**
 - Termičko napačanje
 - Spaterovanje
- **Elektro-depozicija**
- **Spin-on**



Silicijum oksid: SiO_2

- **Upotreba:**
 - Maska u procesima nagrivanja i difuzije
 - Pasivizacija površine
 - Dielektrik gejt MOSFET-a
 - Izolacija
- **Formiranje:**
 - **Rast**
 - Termička oksidacija (daje najbolji kvalitet)
 - Anodizacija
 - **Depozicija**
 - CVD
 - Naparavanje
 - Spaterovanje



- bridging oxygen
- ⊗ non-bridging oxygen
- silicon
- network modifier
- network former
- ⊙ hydroxyl group



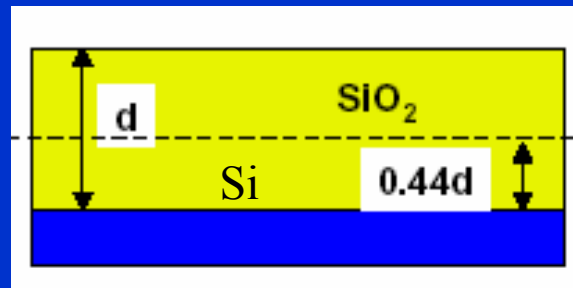
Termička oksidacija Si

- Visokotemperaturni proces (900-1200°C)
- Dve vrste procesa:
 - Suva (dry) oksidacija
 $\text{Si (č)} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$
 - Vlažna (wet) oksidacija
 $\text{Si (č)} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$

Suva oksidacija daje okside većih gustina:

$$\rho(\text{dry})=2.25 \text{ g/cm}^3, \rho(\text{wet})=2.15 \text{ g/cm}^3$$

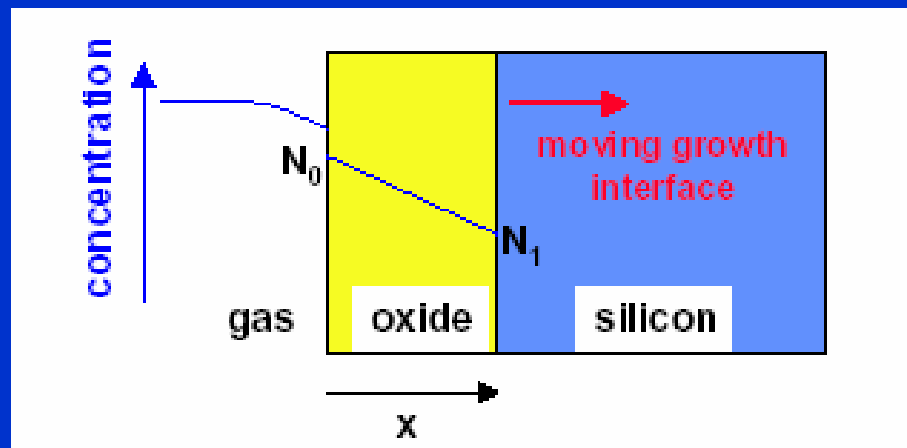
Početna površina Si →





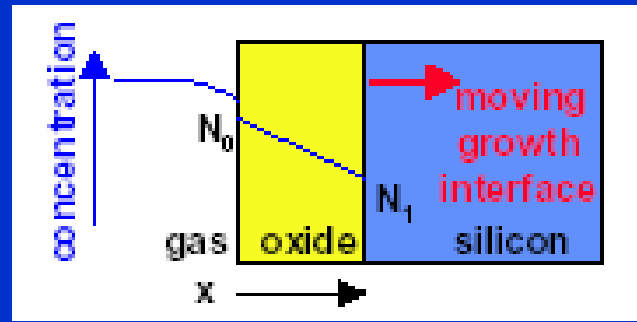
Kinetika rasta termičkog oksida

- **Osnovni model: Grove&Deal-ov model**
 - **Prisustvo oksidanta na medjupovršini ograničeno je njegovom difuzijom kroz oksid**
 - Prvi Fick-ov zakon: fluks $J = -D \delta N / \delta x$
 - Aproksimacija: $\delta N / \delta x = - (N_0 - N_1) / x$





Kinetika rasta termičkog oksida



- N_0 predstavlja graničnu rastvorljivost oksidanta u oksidu
 - $N_0^{\text{O}_2} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ na 1000°C
 - $N_0^{\text{H}_2\text{O}} = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ na 1000°C
- Fluks J' na medjupovršini SiO_2 -Si formira novi oksid

$$J' = k N_1$$

- k je konstanta hemijske reakcije

– U ravnoteži je $J' = J \Rightarrow k \cdot N_1 = -D \cdot \left(-\frac{N_0 - N_1}{x} \right) \rightarrow j = \frac{D \cdot N_0}{x + D/k}$

solve for N_1 , sub back into flux eq



Kinetika rasta termičkog oksida

- Fluks: br molekula oksidanta koji prolazi kroz medjupovršinu
- Brzina pomeranja medjupovršine:

$$dx / dt$$

- n : br molekula oksidanta u jedinici zapremine oksida:

$$n = \frac{\rho_{\text{SiO}_2} \cdot N_A}{GMW_{\text{SiO}_2}} \cdot \begin{cases} 2 & \text{for H}_2\text{O} \\ 1 & \text{for O}_2 \end{cases} = 2.25 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot \begin{cases} 2 & \text{for H}_2\text{O} \\ 1 & \text{for O}_2 \end{cases}$$

- Onda je:

$$\frac{d x}{d t} = \frac{j}{n} = \frac{DN_0/n}{x + D/k}$$

- Uzimajući: $2D/k = A$ i $2DN_0/n = B$

- Integracija pri početnom uslovom $x(t=0) = x_i$ daje:



Kinetika rasta termičkog oksida

$$x(t) = \frac{A}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{t+\tau}{A^2/4B}} - 1 \right]$$

- gde je τ “offset” vreme kojim se uzima u obzir prisustvo prirodnog oksida na površini u trenutku $t=0$

$$\tau = \frac{(x_i)^2 + A \cdot x_i}{B}$$

- n : br molekula oksidanta u jedinici zapremine oksida



Kinetika rasta termičkog oksida

- Granični slučaj Grove&Deal-ovog modela:

- Kratka vremena

$$t + \tau \ll A^2 / 4B$$

$$x(t) = \frac{A}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{t+\tau}{A^2/4B}} - 1 \right] \Rightarrow x(t) = \frac{A}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{t+\tau}{A^2/4B} \right) - 1 \right] = \frac{B}{A} \cdot (t + \tau)$$

- Debljina oksida se povećava linearno sa vremenom
- B/A je konstanta linearne brzine:

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{2 DN_0}{n} \right) / \left(\frac{2 D}{k} \right) = \frac{N_0 \cdot k}{n}$$

- Konstanta linearne brzine zavisi od:
 - Brzine reakcije oksidanta i Si (**k**)
 - Rastvorljivosti oksidanta u oksidu (**N₀**)
 - Temperaturna zavisnost je uglavnom zbog brzine reakcije



Kinetika rasta termičkog oksida

- Granični slučaj Grove&Deal-ovog modela:

- Duga vremena

$$t + \tau \gg A^2 / 4B$$

$$x(t) = \frac{A}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2 / 4B}} - 1 \right] \Rightarrow x(t) = \frac{A}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{t + \tau}{A^2 / 4B}} \right] = \sqrt{B \cdot (t + \tau)}$$

- Zavisnost je parabolična: (debljina)² ~ vreme
- B je konstanta parabolične brzine:

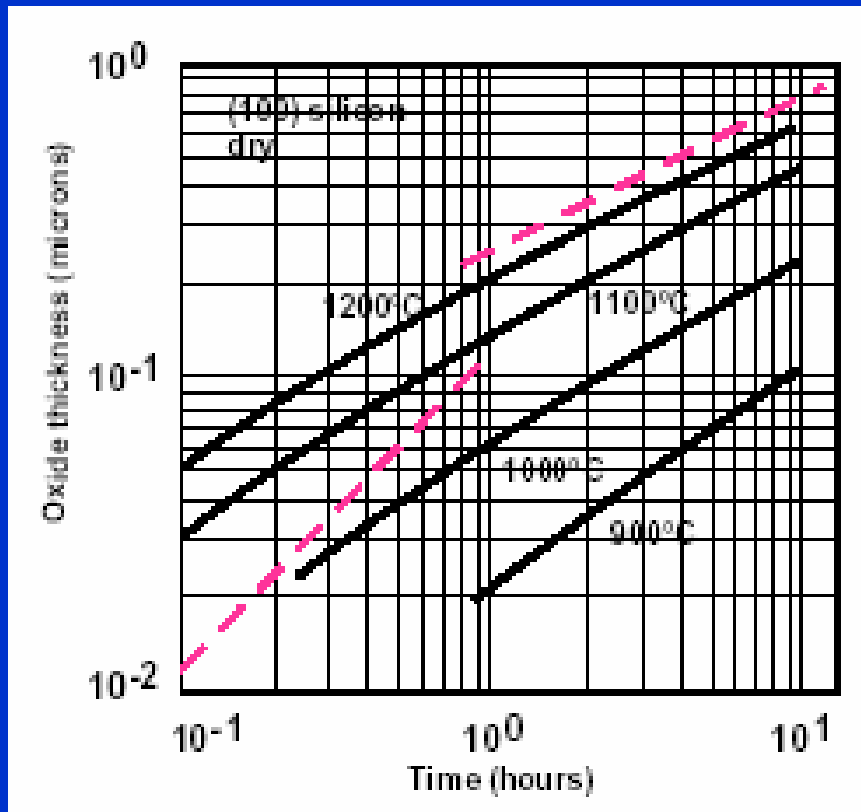
$$B = \frac{2 \cdot D \cdot N_0}{n}$$

- Konstanta parabolične brzine zavisi od:
 - Difuzivnosti oksidanta u oksidu (**D**)
 - Rastvorljivosti oksidanta u oksidu (**N₀**)
 - Temperaturna zavisnost je uglavnom zbog difuzivnosti

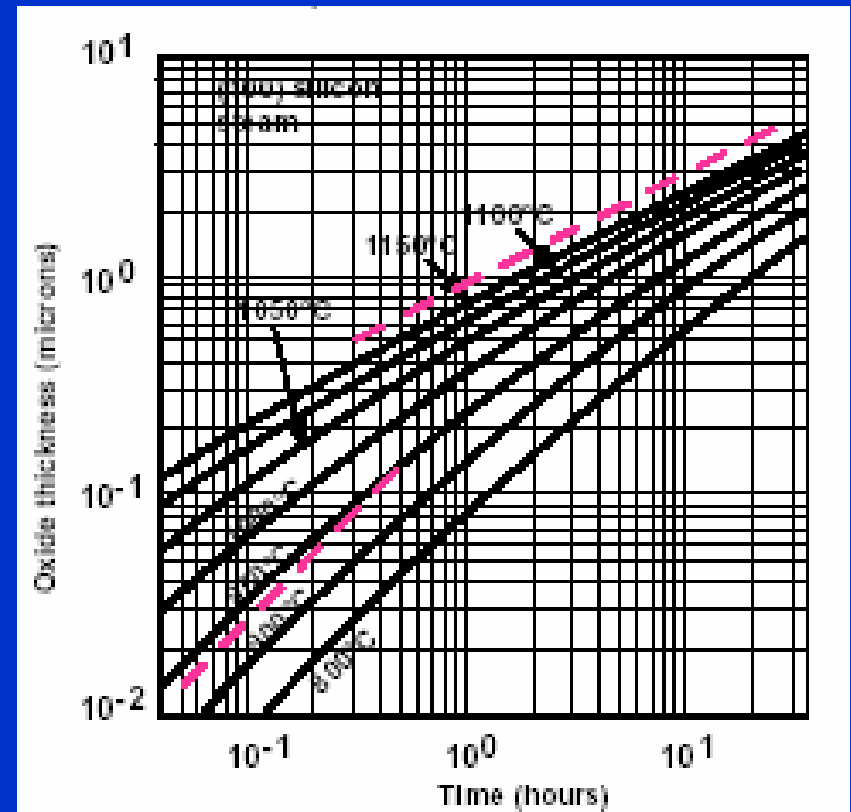


Debljina termičkog oksida

- Suva oksidacija



- Vlažna oksidacija





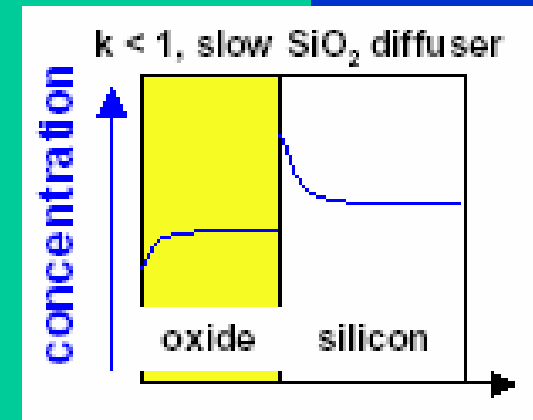
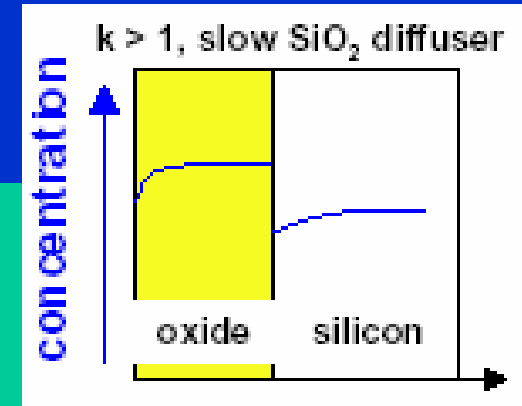
Efekti dopiranja Si na kinetiku rasta termičkog oksida

• Bor

- $k = C_{\text{ox}} / C_{\text{Si}} \sim 3$
- Prime se nagomilavaju u oksidu
 - Imaju mali uticaj na konstantu linearne brzine B/A
 - Povećavaju konstantu parabolične brzine B
 - Efekat značajan tek pri $N_B > \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

• Fosfor

- $k = C_{\text{ox}} / C_{\text{Si}} \sim 0.1$
- Prime se nagomilavaju na površini Si
 - Imaju mali uticaj na konstantu parabolične brzine B
 - Povećavaju konstantu linearne brzine B/A
 - Efekat značajan tek pri $N_P > \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$





CVD (Chemical Vapor Deposition) procesi

- **Osnovno obeležje:** hemijska reakcija gasovitih reaktanata
 - Pritisak: atmosferski - 50 mTora
 - Pobuda reakcije:
 - Termička: T u opsegu 100 – 1000°C
 - Pri višim temperaturama povećava se migracija i pokretljivost molekula reaktanata na površini supstrata
 - Plazmom
 - Optička
- **Materijali:**
 - SiO₂
 - Polikristalni Si (poli)
 - Si₃N₄
 - Metali
 - Fosfosilikatna, borosilikatna, borofosfosilikatna stakla (PSG, BSG, BPSG)



Vrste CVD procesa

- **APCVD** - Atmospheric Pressure CVD
- **LPCVD** – Low Pressure CVD
- **PECVD** – Plasma Enhanced CVD

Koraci CVD procesa

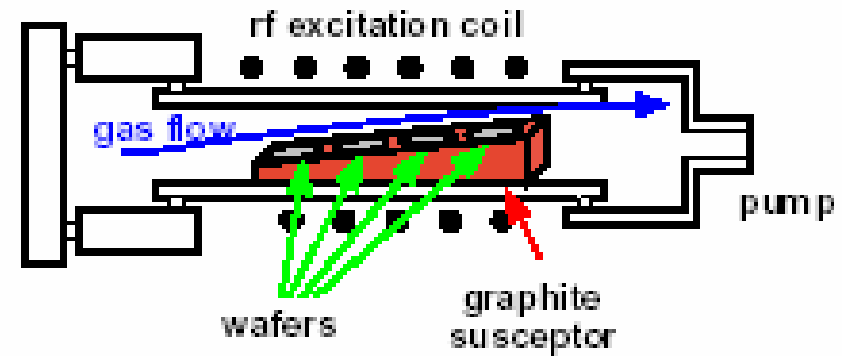
- Uvodjenje gasova u reaktor
- Kretanje molekula gasova ka supstratu
- Adsorpcija reaktanata na supstratu
- Formiranje filma putem hemijske reakcije
- Desorpcija i izvodjenje gasova produkata reakcije



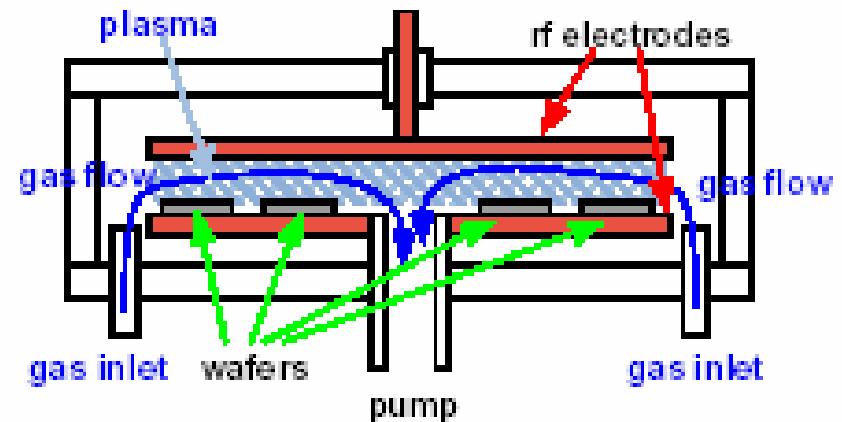
Osnovne konfiguracije CVD reaktora

- Reaktori sa vrućim zidovima
 - **Zagreva se ceo sistem**
 - Termička pobuda reakcija
 - Pritisak:
 - Atmosferski: veća brzina depozicije
 - Nizak (LPCVD): manja brzina depozicije, bolja uniformnost filma
 - Pobuda reakcija plazmom (PECVD)
- Reaktori sa hladnim zidovima
 - **Zagreva se samo supstrat:**
 - otporno ili induktivno

• horizontal tube reactor



• parallel plate plasma reactor





CVD silicijum dioksid

- **Reakcije:**

- $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$
- $\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{nus-produkti}$
- $\text{SiCl}_2\text{H}_2 + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{nus-produkti}$
- $\text{Si}(\text{OCl}_2\text{H}_5)_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{nus-produkti}$
 - $\text{Si}(\text{OCl}_2\text{H}_5)_4$ – tetraetil ortosilikat (TEOS)

- **Uslovi depozicije:**

- APCVD, hladni zidovi, $T \sim 500^\circ\text{C}$
- LPCVD, vrući zidovi, $T \sim 500^\circ\text{C}$
- PECVD, $T \sim 250^\circ\text{C}$ za silan i $T \sim 700^\circ\text{C}$ za TEOS



CVD polisilicijum

- **$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$**
 - Piroliza silana (SiH_4)
 - APCVD, hladni zidovi, 5% silana u vodoniku
 - LPCVD (~ 1 Tor), vrući zidovi, 20-100% silana
- **Veličina zrna:**
 - zavisi od T depozicije i uslova procesa koji slede
- **Dopiranje tokom depozicije:**
 - P-tip: diboran (B_2H_6) – $\rho \sim 0.005 \Omega\text{cm}$
 - N-tip: arsin (AsH_3), fosfin (PH_3) - $\rho \sim 0.02 \Omega\text{cm}$
- **Dopiranje posle depozicije:**
 - Implantacijom ili difuzijom



CVD silicijum nitrid

- **Stehiometrijska formulacija: Si_3N_4**
 - U praksi Si/N varira od 0.7 (obogaćen N) do 1.1 (obogaćen Si)
- **Uslovi depozicije:**
 - **LPCVD: 700-900°C**
 - $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$
 - $3\text{Si}_2\text{Cl}_2\text{H}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{HCl} + 6\text{H}_2$
 - Si/N oko 0.75, 4-8% H
 - $\rho \sim 3 \text{ g/cm}^3$, $n \sim 2.0$, $k \sim 6-7$
 - **PECVD: 250-350°C**
 - $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z + \text{H}_2$
 - $\text{SiH}_4 + \text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z + \text{H}_2$
 - Si/N od 0.8-1.2, ~20% H
 - $\rho \sim 2.4-2.8 \text{ g/cm}^3$, $n \sim 1.8-2.5$, $k \sim 6-9$



CVD metali

- **Volfram:**



- T~ 300°C, hladni zidovi

- Athezija sa SiO_2 slaba pa se koristi TiN kao medjusloj

- **Aluminijum:**

- Tri-izobutil-aluminijum (TIBA)

- LPCVD, T~ 200-300°C

- **Bakar:**

- Cu β-diketon, T~ 100-200°C