Formule di "Dispositivi Elettronici"

- Resistenza $R = \rho L/A$. ❋ Resistività $\rho = 1/\sigma = 1/(\mu N q)$. ❋ L Lunghezza, A area sezione, N concentrazione maggioritario
- $\sigma = q\left(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p\right)$, N.B. il contributo del portatore minoritario è spesso trascurabile
- $j_{\text{drift}} = \sigma E$, $v = \mu E$. ❋ j densità corrente deriva, μ mobilità, v velocità delle cariche. ❋ N.B. v non supera mai $\overline{v_{\text{th}}}$
- Mobilità portatori (*no p*) $\mu_{n,p} = q\tau_m/m^*$. ❋ τ_m tempo collisione medio, m^* massa efficace
- Tensione termica $V_T = kT/q$. ❋ Energia termica: $E = \frac{l}{2}kT$. ❋ v terimca $\overline{v_{\text{th}}} = \sqrt{lkT/m^*}$, $l \in \{1,2,3\}$, gradi di libertà
- Concentrazione intrinseca $n_i\left(T\right) = n_i\left(300K\right) \cdot \left(T/300K\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300K}\right)\right)$. ❋ $n_i\left(T\right) = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$
- Legge di azione di massa (valida solo all'equilibrio) $n \cdot p = n_i^2$. ❋ n(o p) concentrazione di elettroni (o lacune)
- In caso di ionizzazione completa (ipotesi di default): Drogaggio $n \to n \simeq N_D$, Drogaggio $p \to p \simeq N_A$
- Diffusione $D_n = V_T \cdot \mu_n$, $D_p = V_T \cdot \mu_p$. ❋ D_n, D_p coefficiente di diffusione delle lacune, elettroni. $D_{n,p} = \overline{v_{\text{th}}}^2 \cdot \tau_{n,p}$
- Fick: $\Phi = -D_{n,p} \cdot \partial N/\partial x$. ❋ Corrente di diffusione $j_{\text{diff}} = \pm q\Phi$, N portatore (sostituire o n o p) . $D_{n,p}$ diffusività portatore
- Eq. continuità della carica: $\frac{\partial N}{\partial t} = G - \frac{N-N_0}{\tau_r} \pm \frac{1}{q}\frac{\partial j_N}{\partial x}$. ❋ Con $G_n = G_p$ tasso generazione, $\frac{N-N_0}{\tau_r} = R_N$, tasso ricombinazione
- $j_N = j_{\text{drift}} + j_{\text{diff}} = |q|\, N\mu_N E \mp qD_N\frac{dN}{dx}$. ❋ $\frac{\partial N}{\partial t} = G - \frac{N-N_0}{\tau_r} \mp \mu_N\frac{\partial(N\cdot E)}{\partial x} + D_N\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$. ❋ Con $\mp$ considerare + per elettroni
- Tensione di built-in $V_{\text{bi}} = V_T \cdot \ln\left(N_A \cdot N_D/n_i^2\right) = \phi_{F,p} - \phi_{F,n}$. ❋ $\phi_i = \left(V_{\text{bi}} + V_R\right) = F_{\max}W/2$. ❋ Con V_R Tensione *inversa*
- Larghezza regione svuotata: $W = x_n + x_p = \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}\phi_i/q \cdot \left(1/N_A + 1/N_D\right)}$. ❋ Giunzione unilatera: $W \simeq \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}\phi_i/q \cdot \left(1/N_{\min}\right)}$
- Campo elettrico massimo: $F_{\max} = \frac{2\phi_i}{W} = \sqrt{\frac{2q\phi_i \cdot N_A N_D}{\varepsilon_{\text{Si}} \cdot (N_A + N_D)}}$. ❋ Regione svuotata nelle zone: $x_p = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}F_{\max}}{qN_A}$, $x_n = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}F_{\max}}{qN_D}$.
- Lunghezza di diffusione: $L_n = \sqrt{D_n\tau_n}$, $L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$, se $L_n, L_p \ll W_n, W_p$ (condizione di base corta, altrimenti base lunga)
- Densità di minoritari (in zona p, analogo per n): $n\left(0\right) = n_0 e^{V/V_T} = n_i^2/N_A e^{V/V_T}$, $n'\left(0\right) = n_0 \cdot \left(e^{V/V_T} - 1\right)$.
  ❋ Per base lunga: $n\left(x\right) = n_0 + n'\left(0\right) \cdot e^{-x/L_n}$. ❋ Per base corta $n\left(x\right) = n_0 + n'\left(0\right) \cdot \left(1 - x/W_p\right)$
- Densità di corrente dei minoritari in zona p (analogo in zona n) $\mathcal{J}_n\left(x\right) = -q\Phi_n = qD_n\frac{\partial n}{\partial x}$. Φ_n flusso, applica Fick.
  ❋ Base lunga: $\mathcal{J}_n\left(0\right) = \frac{qD_n n_i^2}{N_D L_n} \cdot \left(e^{V/V_T} - 1\right)$, $\mathcal{J}_n\left(x\right) = \mathcal{J}_n\left(0\right) \cdot e^{-x/L_n}$. ❋ Base corta: $\mathcal{J}_n\left(x\right) = \mathcal{J}_n\left(0\right) = \frac{qD_n n_i^2}{W_p N_D} \cdot \left(e^{V/V_T} - 1\right)$.
- Densità di corrente di saturazione inversa nel diodo (alcuni termini potrebbero essere trascurabili):
  Usa W_n, W_p al posto di L_p, L_n se si verifica la condizine di base corta. ❋ $J_s = q \cdot n_i^2\left(\frac{D_p}{(L_p, W_n)N_D} + \frac{D_n}{(L_n, W_p)N_A}\right)$
- Densità di corrente diretta nel diodo: $J\left(V\right) = J_s \cdot \left(e^{V/V_T} - 1\right)$. ❋ V tensione *diretta*, $J = \left|\mathcal{J}_n\left(0\right)\right| + \left|\mathcal{J}_p\left(0\right)\right|$
- Corrente totale nel diodo: $I_S = J_S \cdot A$ ❋ $I\left(V\right) = J\left(V\right) \cdot A = I_s \cdot \left(e^{V/V_T} - 1\right)$ ❋ A area giunzione.
- Livelli di Fermi: ❋ Tipo n: $\phi_F = -V_T\ln\left(N_D/n_i\right)$. ❋ Tipo p: $\phi_F = V_T\ln\left(N_A/n_i\right)$. ❋ $\phi_F = V_T\ln\left(p/n_i\right) = -V_T\ln\left(n/n_i\right)$
- Differenza delle funzioni lavoro: $\phi_{\text{ms}} = \Phi_G - q\phi_F = \phi_m - \left(\chi_{\text{Si}} + E_{\text{gap}}/2 + q\phi_F\right)$ ❋ ϕ_F livello di Fermi, χ_{Si} affinità elettronica
- Capacità ossido: $c'_{\text{ox}} = \varepsilon_{\text{ox}}/t_{\text{ox}}$ ❋ t_{ox} spessore dell'ossido. ❋ $c_{\text{ox}} = c'_{\text{ox}} \cdot W \cdot L$ ❋ con W, L, larghezza e lunghezza del MOS
- Tensione di banda piatta: $V_{\text{FB}} = \phi_{\text{ms}} - \frac{Q'_{\text{ox}}}{c'_{\text{ox}}}$ ❋ c'_{ox} capacità ossido per superficie, Q'_{ox} carica sepolta nell'ossido per superficie
- Tensione di soglia: $V_{\text{th}} = V_{\text{FB}} + \Psi_S + Q'_d/c'_{ox}$, ❋ $\Psi_S = 2\phi_F$, potenziale di superficie a soglia ($Q'_c = 0$), vale sempre $\Psi_S \lesssim 2\phi_F$
- Carica svuotata: $Q'_d\left(\Psi\right) = \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}qN_{A,D}\Psi}_s$ carica svuotata, ❋ Ψ_S potenziale di superficie, $Q'_{\text{d,max}}\left(\Psi_{\max}\right)$, con $\Psi_S \simeq 2\phi_F$
- Lunghezza svuotata: $W = Q'_d/qN_A$. ❋ Concentrazione di carica svuotata: $qn'_d = Q'_d$, ❋ con n'_d concentrazione di elettroni
- Carica nel canale: $V_{\text{GS}} = V_C + V_{\text{th}} + \frac{Q'_d(\Psi + V_c) - Q'_d(\Psi)}{c'_{ox}} + \frac{Q'_c}{c'_{ox}}$ ❋ Effetto body: $\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}qN_{A,D}}}{c'_{ox}}$, $V_{\text{th,x}} = V_{\text{th}} + \gamma\left(\sqrt{V_{\text{SB}} + \Psi_S} - \sqrt{\Psi_S}\right)$
- Campi MOS: $F_\Psi = \frac{Q'_c + Q'_d}{\varepsilon_{\text{Si}}}$, $F_{\Psi^-} = \frac{Q'_d}{\varepsilon_{\text{Si}}}$, $F_{\text{ox}} = F_\Psi\frac{\varepsilon_{\text{Si}}}{\varepsilon_{\text{ox}}} + \frac{Q'_{\text{ox}}}{\varepsilon_{\text{ox}}}$, F_Ψ campo sulla superficie, F_{Ψ^-} limite campo sotto la superficie
- Correnti n-MOSFET: $k = \frac{1}{2}\mu_n c'_{ox}\frac{W}{L}$. ❋ Saturazione: $I_{D,\text{sat}} = k \cdot \left(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}\right)^2$. ❋ Triodo: $I_D = k \cdot \left[2\left(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}\right) - V_{\text{DS}}\right] \cdot V_{\text{DS}}$
- Conduttanza (G_{canale}), Resistenza (R_{canale}) MOSFET triodo: $G_{\text{canale}} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{\text{DS}}} = 2k \cdot \left(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}} - V_{\text{DS}}\right)$, $R_{\text{canale}} = G_{\text{canale}}^{-1}$
- Altre correnti MOSFET: $I_{DS} = qn'_c Wv = Q'_c Wv$. ❋ Corrente massima trasportabile: $I_{\text{DS,max}} = \left(V_{\text{GS}} - V_C - V_{\text{th}}\right)Wv_{\text{sat}}$
- Velocità media cariche nel canale: $v = \mu(V_{\text{GS}} - \overline{v_{\text{th}}})/L$. ❋ Tempo di attraversamento: $\tau = L^2/\mu(V_{\text{GS}} - \overline{v_{\text{th}}})$, $v_{\text{sat}} \approx \overline{v_{\text{th}}}$
- Frequenza di taglio MOSFET: $f_t = 1/2\pi\tau$. ❋ Tempo risposta: $\tau = L/v$, $v \approx \frac{\mu F}{1 + F/F_{\max}}$, v velocità cariche

V3.0, rel 03-07-18 at 8:36PM
Eidted by Alessio Serraino