Ladungsträger im Halbleiter

Massenwirkungsgesetz:

Im thermodynamischen Gleichgewicht gilt: $n_0 p_0 = n_i^2$

n_0, p_0 :Gleichgewichtsdichten Elektronen, Löcher

n_i : intrinsische Ladungsträgerkonzentration

spezifischer Widerstand des Halbleiterkristalls

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\left(p\mu_p + n\mu_n\right)}$$

μ_n, μ_p : Beweglichkeit der Elektronen, Löcher

Diffusionskonstante

$$D_{n,p} = \frac{kT}{q}\mu_{n,p}$$

Diffusionslänge (Debye-Länge)

$$L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p}\tau_{n,p}}$$

$\tau_{n,p}$:Lebensdauer von Elektronen im p-Material, Löchern im n-Material

Zustandsdichte von Elektronen im Leitungsband

$$N_e(E) = \frac{4\pi\left(2m_e^*\right)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\sqrt{E - E_C}$$

m_e^* : effektive Masse der Elektronen

E_C : Energieniveau des Leitungsbandes

Zustandsdichte von Löchern im Valenzband

$$N_h(E) = \frac{4\pi\left(2m_h^*\right)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\sqrt{E_V - E}$$

m_h^* : effektive Masse der Löcher

E_V : Energieniveau des Valenzbandes

Verteilungsfunktionen

Fermi: $$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

Maxwell-Boltzmann: gilt für $|E - E_F| >> kT$ $$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

Effektive Zustandsdichten:

Für Elektronen im Leitungsband: $N_C = 2\left(\frac{2\pi\, m_e^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$

Für Löcher: $N_V = 2\left(\frac{2\pi\, m_h^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$

Fermi-Niveau für den intrinsischen Fall

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{1}{2} kT \,\ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right)$$

Ladungsträgerkonzentration im intrinsischen Fall

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\, \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

grobe Näherung: $n_i(T) \approx T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$

Ladungsträgerkonzentration im dotierten Halbleiter (in Boltzmann-Näherung)

$$n_0 = N_C \,\exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \qquad p_0 = N_V \,\exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right)$$

$$n_0 = n_i \,\exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \qquad p_0 = n_i \,\exp\left(-\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)$$

Ladungsträgerkonzentration z.B. bei Abschalten einer Lichtquelle:

$$n(t) = n_0 + (n(0) - n_0)\exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$$

Fermi-Niveau im dotierten Halbleiter

n-dotiert: $E_F = E_{Fi} + kT \,\ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right)$ p-dotiert: $E_F = E_{Fi} - kT \,\ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$

Ladungsneutralität (wenn keine Dotierkonzentration vernachlässigt werden kann)

$$n = \frac{1}{2}\left[\left(N_D^+ - N_A^-\right) + \sqrt{\left(N_D^+ - N_A^-\right)^2 + 4n_i^2}\right]$$

Halbleiterdioden

Diffusionsspannung

$$U_{Diff} = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = \frac{E_g - \left|E_{Fp} - E_{Vp}\right| - \left|E_{Cn} - E_{Fn}\right|}{q}$$

Maximale Feldstärke

$$\left|E_{\max}\right| = \frac{2\left(U_{Diff} - U\right)}{w_{RL}}$$

Bandaufwölbung $= q\left(U_{Diff} - U\right) \quad \left(E_{Cp} - E_{Cn};\, E_{Vp} - E_{Vn}\right)$

Stetigkeit des elektrischen Feldes

Im thermodynamischen Gleichgewicht gilt: $N_D \cdot x_n = N_A \cdot x_p$

Raumladungszone

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}\left(U_{Diff} - U\right)}{qN_D}\cdot\frac{N_A}{N_A + N_D}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}\left(U_{Diff} - U\right)}{qN_A}\cdot\frac{N_D}{N_A + N_D}}$$

$$w_{RL} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}\left(U_{Diff} - U\right)}{q}\cdot\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

einseitig abrupter pn-Übergang: $w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}U_{Diff}}{qN}}$ $\quad N = N_D \text{ für } p^+n-\text{Übergang}$, $\quad N = N_A \text{ für } n^+p-\text{Übergang}$

Sperrschichtkapazität

$$C_S = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{w_{RL}}\cdot A = A\cdot\sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{2\left(U_{Diff} - U\right)}\cdot\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$$

einseitig abrupter pn-Übergang: $C_S = A\cdot\sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_{HL}N}{2\left(U_{Diff} - U\right)}}$

Minoritätsträgerkonzentrationen an den Rändern der Raumladungszone

p-Gebiet: $n(x) - n_{p,0} = n_{p,0}\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right)\cdot\exp\left(\frac{x + x_p}{L_n}\right)$

n-Gebiet: $p(x) - p_{n,0} = p_{n,0}\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right)\cdot\exp\left(-\frac{x - x_n}{L_p}\right)$

Diffusionsstrom

$$j = J_S\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right)$$

Sperrsättigungsstromdichte

$$J_S = qn_i^2\left(\frac{D_n}{L_n N_A}+\frac{D_p}{L_p N_D}\right) = qn_i^2\left(\frac{L_n}{\tau_n N_A}+\frac{L_p}{\tau_p N_D}\right)$$

Flussspannung im n-Teil der Diode

$$U = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{p_n(x_n)}{p_{n,0}}\right)$$

Kleinsignalparameter (niedrige Frequenzen)

Diffusionsleitwert: $G_d = \frac{q}{kT}\left(\frac{qD_p p_{n,0}}{L_p}+\frac{qD_n n_{p,0}}{L_n}\right)\exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$ (flächenbezogen)

Diffusionskapazität: $C_d = \frac{q}{kT}\left(\frac{qL_p p_{n,0}}{2}+\frac{qL_n n_{p,0}}{2}\right)\exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$ (flächenbezogen)

Generationsstromdichte

$$j_{Gen} = -\frac{qn_i w_{RL}}{2\tau_G} \quad \textit{für } U \ll 0V$$

Rekombinationsstromdichte

$$j_{\mathrm{Re}k} = \frac{qn_i w_{RL}}{2\tau_R}\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) \quad \textit{für } U \gg 0\,V$$

Feldeffekttransistoren

Potentialdifferenz der Ferminiveaus

$$\phi_B = \frac{E_{Fi} - E_F}{q}$$

p-Halbleiter: $\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} > 0$ n-Halbleiter: $\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{N_D} < 0$

Austrittsarbeit des Halbleiters

$$q\phi_{HL} = q\chi_{HL} + \frac{E_g}{2} + q\phi_B$$

Austrittsarbeitsdifferenz zwischen Metall und Halbleiter

$$q\phi_{MHL} = q(\phi_M - \phi_{HL})$$

Flachbandspannung

Ohne Isolatorladungen: $U_{FB} = \phi_{MHL}$ mit Isolatorladungen: $U_{FB} = \phi_{MHL} - \frac{Q_{IS}}{C_{IS}}$

Effektive Isolatorladung im Volumen

$$Q_{V,eff} = \frac{1}{x_{IS}} \int_0^{x_{IS}} x\rho_{IS}(x)dx$$

Weite der Raumladungszone

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN}|\phi_S|}$$

maximale Raumladungsweite (Einsetzen starker Inversion): $w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN} 2|\phi_B|}$

Oberflächenpotential

$$\phi_S = -U_{FB} - U_{Ox}$$

Einsatzspannung (Beginn der starken Inversion)

$$U_T = U_{FB} + 2\phi_B - \frac{Q_{HL}}{C_{IS}}$$

$$\Delta U_T = U_{FB,mit} - U_{FB,ohne}$$

Ladung in der Raumladungszone

n-Halbleiter: $Q_{HL} = +\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL} q N_D |\phi_B|}$ p-Halbleiter: $Q_{HL} = -\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL} q N_A |\phi_B|}$

Ladung im Metall

$$Q_M = -Q_{HL} - Q_{IS}$$

Gesamtkapazität

$$C = \frac{C_{IS} C_{HL}}{C_{IS} + C_{HL}}$$

Isolatorkapazität

$C_{IS} = \frac{\varepsilon_{IS}\varepsilon_0}{x_{IS}} \cdot A$ flächenbezogen: $C_{IS} = \frac{\varepsilon_{IS}\varepsilon_0}{x_{IS}}$

Halbleiterkapazität

$$C_{HL} = \frac{\varepsilon_{HL}\varepsilon_0}{w_{RL}}$$

Widerstand und Ladung des Kanals

$R_C = \rho \frac{L}{x_C W} = \frac{L}{\mu_n |Q_n| W}$ $Q_n = -(U_G - U_T)C_{IS}$

Transkonduktanz

$$\beta = \mu_n C_{IS} \frac{W}{L}$$

Strom-Spannungsbeziehungen für den n-Kanal-Transistor

Linearer Bereich: $I_D = \beta (U_G - U_T) U_D$ für $0 \le U_D << U_G - U_T$

Triodenbereich: $I_D = \beta \left((U_G - U_T) U_D - \frac{U_D^2}{2} \right)$ für $0 \le U_D \le U_G - U_T$

Sättigungsbereich: $I_D = \frac{\beta}{2} (U_G - U_T)^2$ für $0 \le U_G - U_T \le U_D$

Strom-Spannungsbeziehungen für den p-Kanal-Transistor

Linearer Bereich: $I_D = -\beta (U_G - U_T) U_D$ für $0 \ge U_D >> U_G - U_T$

Triodenbereich: $I_D = -\beta \left((U_G - U_T) U_D - \frac{U_D^2}{2} \right)$ für $0 \ge U_D \ge U_G - U_T$

Sättigungsbereich: $I_D = -\frac{\beta}{2} (U_G - U_T)^2$ für $0 \ge U_G - U_T \ge U_D$

Unterschwellenstrom (Stromfluss bei schwacher Inversion)

$$I = \frac{\beta x_C q U_T n_i^2}{C_{IS} N_A} \exp\left(\frac{\phi_S}{U_T} \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{U_D}{U_T} \right) \right)$$

Substratsteuerfaktor

n-Kanal: $\gamma = + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_A}}{C_{IS}}$ p-Kanal: $\gamma = - \frac{\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_D}}{C_{IS}}$

daraus folgt für die Einsatzspannung: $U_T = U_{FB} + 2\phi_B + \gamma \sqrt{|2\phi_B - U_B|}$

U_B: Sperrspannung

Bipolartransistoren

Minoritätsladungsträgerdichte im neutralen Basisgebiet

$$n_B(x) \approx n_{B,0} \exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\} \frac{d_B - x}{d_B}$$

Minoritätsladungsträgerdichten in den neutralen Emitter- und Kollektorgebieten

$$p_C(x) - p_{C,0} = p_{C,0}\left(\exp\left\{\frac{qU_{BC}}{kT}\right\} - 1\right) \cdot \exp\left\{-\frac{x - x_C}{L_{p,C}}\right\}$$

$$p_E(x) - p_{E,0} = p_{E,0}\left(\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\} - 1\right) \cdot \exp\left\{\frac{x + x_E}{L_{p,E}}\right\}$$

Strom-Spannungs-Beziehungen im Normalbetrieb

$$I_E \approx A\,q\left(\frac{D_{n,B} n_{B,0}}{d_B} + \frac{D_{p,E}\, p_{E,0}}{L_{p,E}}\right) \exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

$$I_C \approx \frac{A\,q\,D_{n,B} n_{B,0}}{d_B} \exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

$$I_B = I_E - I_C \approx \frac{A\,q\,D_{p,E}\, p_{E,0}}{L_{p,E}} \exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

Speicherladung der Basis im Normalbetrieb

$$Q_{B,S} = -\frac{A\,q\,d_B n_{B,0}}{2} \exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\} = -\frac{I_C d_B^2}{2D_{n,B}} = -I_C \tau_B$$

τ_B : Laufzeit durch die Basis, Zeit für die (Um-)Ladung