

Ladungsträger im Halbleiter

Stromdichte: $\vec{j} = qN\mu\vec{E}$; $\vec{j} = q(p\vec{v}_p - n\vec{v}_n) = q(p\mu_p + n\mu_n)\vec{E}$

Diffusionsstromdichte: $j_{Diff}(x,t) = q\left(D_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} - D_p \frac{\partial p(x,t)}{\partial x}\right)$ S.28

Diffusionskonstante: $D_{n,p} = \frac{kt}{q} \mu_{n,p} = U_T \mu_{n,p}$

Gesamtstromdichte: $\vec{j}_{Drift} + \vec{j}_{Diff}$
 $\vec{j}_{tot} = q(n\mu_n \vec{E} + D_n \text{grad}n) + q(p\mu_p \vec{E} - D_p \text{grad}p)$ S.31

Nettorekombinationsrate: $U = r(p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta n \Delta p)$ S.37

Rekombinationszentrum:

$$U \approx \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} (pn - n_i^2) N_T}{\sigma_n \left(n + n_i \exp\left\{ \frac{E_T - E_{Fi}}{kT} \right\} \right) + \sigma_p \left(p + n_i \exp\left\{ -\frac{E_T - E_{Fi}}{kT} \right\} \right)}$$
 S.38

in Bandmitte: $E_T = E_{Fi}$ $U \approx \frac{\sigma v_{th} (pn - n_i^2) N_T}{n + p + 2n_i}$

Lebensdauer: $\tau_r = \frac{1}{rp_0}$ (p-dotiert) S.41

Diffusionslänge: $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

Internes elektrisches Feld: $E_{int} = -\frac{kT\left(\mu_n \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}\right)}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$ S.45

Kontinuitätsgleichung:

 S.48

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} &= \frac{\partial j_p(x,t)}{q\partial x} + G_p - R_p = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_p p(x,t) E(x,t) - D_p \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \right) + G_{p,ext} - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau_p} \\ &= -p(x,t) \mu_p \frac{\partial E(x,t)}{\partial x} - \mu_p E(x,t) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + G_{ext} - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau_p} \end{aligned}$$

Zustandsdichte:

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

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

S.54

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

Boltzmann - Verteilung: $f_{B,e}(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$

Ladungsträgerkonzentration: S.59

intrinsisch: $n_0 = \int_{E_c}^{\infty} N_e(E) f(E) dE \approx N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$ $N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$

$p_0 = \int_{-\infty}^{E_V} N_h(E) (1 - f(E)) dE \approx N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$ $N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$

$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$

dotiert: $n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) = N_c \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_c}{kT}\right)$

$p_0 = n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_V - E_{Fi}}{kT}\right)$

bei Donatoren und Akzeptoren:

$$p_0 = \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

für $n_i \rightarrow 0$: $p_0 \approx N_A - N_0$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}$$

Dioden

Diffusionsspannung: $U_{Diff} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$ S.7

Raumladungsdichte: $\rho(x) = q[N_D^+(x) - N_A^-(x) + p(x) - n(x)]$

Poissongleichung: $\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_{HL}\epsilon_0}$ S.9

Weite der Raumladungszone: $w_{RL} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}U_{Diff}}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$ S.15

Einseitig abrupt: $w_{RL} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}U_{Diff}}{qN}}$

Mithilfe der Debyelänge:

$$\begin{aligned} x_n &= L_{D,n} \cdot \sqrt{\frac{2qU_{Diff}}{kT} \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D}} & L_{D,n} &= \sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_{HL}kT}{q^2N_D}} \\ x_p &= L_{D,p} \cdot \sqrt{\frac{2qU_{Diff}}{kT} \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D}} & L_{D,p} &= \sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_{HL}kT}{q^2N_A}} \end{aligned} \quad ; \quad \text{S.18}$$

Bei Anlegen einer Spannung: $w_{RL} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}(U_{Diff} - U)}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$ S.21

Sperrschichtkapazität: $C_S = \frac{\epsilon_0\epsilon_{HL}}{w_{RL}} \cdot A = A \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_0\epsilon_{HL}}{2(U_{Diff} - U)} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$ S.23

Einseitig abrupt: $C_S = A \sqrt{\frac{q\epsilon_0\epsilon_{HL}N}{2(U_{Diff} - U)}}$

für N niedrig dotierte Seite einsetzen

Diffusionsstrom: $j = J_S \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)$ S.38

Sperrsättigungsstromdichte:

$$J_S = q \left(\frac{D_n n_{p,0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n,0}}{L_p} \right) = q n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) = q n_i^2 \left(\frac{L_n}{\tau_n N_A} + \frac{L_p}{\tau_p N_D} \right)$$

Diffusionsleitwert für niedrige Frequenzen:

S.42

$$G_d = \frac{q}{kT} \left(\frac{q D_p p_{n,0}}{L_p} + \frac{q D_n n_{p,0}}{L_n} \right) \exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$$

Diffusionskapazität für niedrige Frequenzen:

$$C_D = \frac{q}{kT} \left(\frac{q L_p p_{p,0}}{2} + \frac{q L_n n_{p,0}}{2} \right) \exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$$

Generationsstromdichte: $j_{Gen} = -\frac{q n_i w_{RL}}{2\tau_G}$

S.45

Rekombinationsstrom:

S.47

$$j_{Rek} = q \int_{-x_p}^{x_n} (R - G) dx \approx \frac{q w_{RL} \sigma_{th} N_i n_i}{2} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) = \frac{q n_i w_{RL}}{2\tau_R} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) \text{ für } U \gg 0$$

Kennlinienbeschreibung:

S.50

$$I = I_S \left(\exp\left(\frac{q(U_A - IR_S)}{kT}\right) - 1 \right) + I_{G/R,0} \left(\exp\left(\frac{q(U_A - IR_S)}{2kT}\right) - 1 \right) + \frac{U_A - IR_S}{R_p} - I_{ph}$$

Feldeffekttransistoren

Oberflächenpotential an Grenzfläche Halbleiter/Isolator: S.6

$$q \cdot \phi_S = E_i(\infty) - E_i(0) \quad \phi_S : \text{Oberflächenpotential}$$

Potential allgemein:

$$\text{p-Halbleiter: } \phi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad ; \quad \text{n-Halbleiter: } \phi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{N_D}$$

Austrittsarbeit(sdifferenz): S.12

$$q\phi_{HL} = q\chi_{HL} + \frac{E_g}{2} + q\phi_B \quad ; \quad q\phi_{MHL} = q(\phi_M - \phi_{HL})$$

Flachbandspannung: $U_{FB} = \phi_{MHL} - \frac{Q_{IS}}{C_{IS}}$ $Q_{IS} = Q_{V,diff} + Q_A$ S.13

Ladung: bei Verarmung/schwacher Inversion S.15

$$\rho = qN_D \quad \text{bzw.} \quad \rho = -qN_A$$

Raumladungszone: S.16

$$\text{n-HL: } w_{RL} = \sqrt{-\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}}{qN_D}\phi_S} \quad ; \quad \text{p-HL: } w_{RL} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}}{qN_A}\phi_S}$$

$$w_{RL\max} = \sqrt{\frac{4\epsilon_0\epsilon_{HL}}{qN}|\phi_B|} \quad (\text{starke Inversion})$$

Einsatzspannung: S.17

$$U_{Th} = U_{FB} + 2\phi_B - \frac{Q_{HL}}{C_{IS}} \quad ; \quad Q_{HL} =: \text{n-HL: } \sqrt{4\epsilon_0\epsilon_{HL}qN_D|\phi_B|}$$

$$\text{p-HL: } -\sqrt{4\epsilon_0\epsilon_{HL}qN_A|\phi_B|}$$

Kapazität: S.18

$$C = \frac{C_{IS}C_{HL}}{C_{IS} + C_{HL}} \quad ; \quad C_{IS} = \frac{\epsilon_{IS}\epsilon_0}{x_{IS}}(\cdot A) \leftarrow \text{evtl. nicht flächenbezogen}$$

Verarmung und schwache Inversion:

S.20

$$C_{HL} = \frac{\varepsilon_{HL} \varepsilon_0}{w_{RL}} = \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL} N}{2 \phi_S}}$$

starke Inversion:

$$C_{HL} = \frac{\varepsilon_{HL} \varepsilon_0}{w_{RL_{\max}}} = \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{4 |\phi_B|}} = \text{const.}$$

Drainstrom: (n-Kanal)

S.32

$$\text{Linearer Bereich: } I_D = \beta (U_G - U_{Th}) \cdot U_D \quad 0 \leq U_D \ll U_G - U_{Th}$$

$$\text{Triodenbereich: } I_D = \beta \left((U_G - U_{Th}) U_D - \frac{U_D^2}{2} \right) \quad 0 \leq U_D \leq U_G - U_{Th}$$

$$\text{Sättigungsbereich: } I_D = \frac{\beta}{2} (U_G - U_{Th})^2 \quad 0 \leq U_G - U_{Th} \leq U_D$$

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

Sperrspannung am Substrat:

S.41

$$U_{Th} = U_{FB} + 2\phi_B + \gamma \sqrt{|2\phi_B - U_B|}$$

$$\text{Substratsteuerfaktor: } \gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_A}}{C_{IS}} \quad \text{n-Kanal}$$

$$\gamma = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_D}}{C_{IS}} \quad \text{p-Kanal}$$

Bipolartransistoren

Allgemeines:

$$I_B = I_E - I_C = I_{pE} + I_{nE} - (I_{pC} + I_{nC}) \quad \text{S.14}$$

Minoritätsladungsträgerdichte:

$$\text{Im Basisgebiet: } n_B(x=0) = n_{B,0} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right); \quad n_B(x=d_B) = n_{B,0} \exp\left(\frac{qU_{BC}}{kT}\right) \quad \text{S.15}$$

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

$$\text{im Emitter- und Kollektorgebiet:} \quad \text{S.20}$$

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

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

Strom-Spannungs-Beziehungen: S.22

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

$$I_C = \frac{Aq D_{n,B} n_{B,0}}{d_B} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

$$I_B = I_E - I_C = \frac{Aq D_{p,E} p_{E,0}}{L_{p,E}} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

$$\text{mit den Gummelzahlen } Q_B = N_{A,B} d_B \quad Q_{E,eff} = N_{D,E} L_{p,E} \quad \text{S.23}$$

$$I_C = \frac{qAn_i^2}{Q_B/D_{n,B}} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right) \quad I_E = \left(\frac{qAn_i^2}{Q_B/D_{n,B}} + \frac{qAn_i^2}{Q_{E,eff}/D_{p,E}} \right) \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

$$I_B = \frac{qAn_i^2}{Q_{E,eff}/D_{p,E}} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

Transistorparameter:

S.26

Stromverstärkungsfaktor: Basisschaltung Emitterschaltung

$$\text{Großsignalparameter} \quad A = \frac{I_C}{I_E} = \frac{B}{1+B} \leq 1 \quad B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{A}{1-A} \gg 1$$

$$\text{Kleinsignalparameter} \quad \alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E} = \frac{\beta}{1+\beta} \leq 1 \quad \beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \gg 1$$

$$\text{Emitterergiebigkeit: } \gamma = \frac{\partial I_{n,0}}{\partial I_E}$$

Maß für Rekombination

$$\text{Basistransportfaktor: } \alpha_T = \frac{\partial I_{n,d_B}}{\partial I_{n,0}} \quad \alpha = \gamma \alpha_T$$

$$I_C = \alpha I_E = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{\alpha}{\beta} I_E = (1-\alpha) I_E$$

Grenzfrequenzen:

$$\text{Laufzeit: } \tau_{EC} = \tau_E + \tau_B + \tau_D + \tau_C = \frac{kT}{qI_E} C_E + \frac{d_B^2}{2D_{n,B}} + \frac{x_C - d_B}{v_S} + R_C (C_C + C_S) \quad \text{S.33}$$

$$\text{Transitfrequenz: } f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}} \quad \text{S.35}$$

Leistungsbaulemente

Leistungsdioden:

pin-Struktur: $U_{Sp} = E_{pin}(x_{in} - x_{ip})$

$p\pi n$ - oder pvn -Struktur: $U_{Sp} = \frac{1}{2}(E_{\max} + E_{\min})(x_{in} - x_{ip})$

Durchbruchspannung:

$U_B = E_B(x_{in} - x_{ip})$ pin-Struktur

$U_B = \frac{1}{2}(E_B + E_{\min})(x_{in} - x_{ip})$ $p\pi n$ - oder pvn -Struktur

Optoelektronische Bauelemente

Photonen:

S.3

Wellenlänge: $\lambda = \frac{c}{f}$

Energie: $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

Impuls: $p_{Ph} = \frac{h}{\lambda}$; k-Wert: $k_{Ph} = \frac{2\pi}{\lambda}$

Absorptionsgesetz:

$\Phi_{Ph}(x, \lambda) = \Phi_{Ph,0}(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x)$

Elektronen-Loch-Generationsrate:

$G(x, \lambda) = -\partial\Phi_{Ph}(x, \lambda)/\partial x = \alpha(\lambda)\Phi_{Ph}(x, \lambda)$

Photostrom:

$I_{Photo} = q\Phi_{Ph}(x, \lambda)wx$; $I_{Photo} = qAGL_{p,n}$