

Inhaltsverzeichnis

1	Ladungsträger im Halbleiter	3
1.1	Debye-Länge	3
1.2	Diffusionskonstante	3
1.3	Diffusionslänge	3
1.4	Fermi–Dirac Verteilung/ Statistik	3
1.5	Fermi–Niveau	4
1.6	Generation/ Rekombination	4
1.7	Internes elektrisches Feld	4
1.8	Kontinuitätsgleichung	4
1.9	Ladungsträgerkonzentration	5
1.10	Lebensdauer	6
1.11	Poisson–Gleichung	6
1.12	Spezifischer Leitwert	6
1.13	Stromdichte	6
1.14	Zustandsdichte	7
2	Halbleiterdiode ohne äußere Beschaltung	7
2.1	Diffusionsspannung	7
2.2	Elektrisches Feld	7
2.3	Elektrisches Potenzial	7
2.4	Sperrschichtkapazität	8
2.5	Raumladungsdichte	8
2.6	Weite der Raumladungszone	8
2.7	Verhalten der Energiebänder	9
3	Halbleiterdiode mit äußerer Beschaltung	9
3.1	Diffusionsstromdichte	9
3.2	Durchbruch	10
3.2.1	Lawinendurchbruch	10
3.2.2	Tunnelstrom	10
3.3	Generations-/Rekombinationsstromdichte	10
3.4	Kleinsignalparameter	11
3.5	Quasi-Ferminiveau	11
3.6	Reale Diodenkennlinie	11
3.7	Schottkydiode	11
3.8	Sperrschichtkapazität	12
3.9	Weite der Raumladungszone	12
4	MIS-Kondenstor	12
4.1	Austrittsarbeit des Halbleiters	12
4.1.1	Austrittsarbeitdifferenz Metall-Halbleiter	12
4.2	Bandverbiegung	12

4.3	Einsatzspannung	13
4.4	Flachbandspannung	13
4.5	Ladung in der Raumladungszone	13
4.6	Kapazität	13
4.6.1	Gesamtkapazität	13
4.6.2	Halbleiterkapazität	14
4.6.3	Isolatorkapazität	14
4.7	Oberflächenpotential	14
4.8	Weite der Raumladungszone	14
5	MOS-Transistor	15
5.1	Einsatzspannung	15
5.2	Strom-Spannungsbeziehung	15
5.2.1	n-Kanal	15
5.2.2	p-Kanal	15
5.3	Substratsteuerfaktor	16
5.4	Unterschwelldenstrom	16
6	Wichtige Konstanten	16

1 Ladungsträger im Halbleiter

1.1 Debye-Länge

n-Gebiet

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{HL} kT}{q^2 n_0}}$$
$$\approx \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{HL} kT}{q^2 N_D}}$$

p-Gebiet:

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{HL} kT}{q^2 p_0}}$$
$$\approx \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{HL} kT}{q^2 N_A}}$$

1.2 Diffusionskonstante

$$D_n = U_T \mu_n$$

$$D_p = U_T \mu_p$$

1.3 Diffusionslänge

$$L_n = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$L_p = \sqrt{D_n \tau_n}$$

1.4 Fermi–Dirac Verteilung/ Statistik

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

Boltzmann–Näherung:

$$f_B(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

1.5 Fermi-Niveau

$$\begin{aligned}E_{Fi} &= \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \\&= \frac{1}{2}E_g + \frac{3}{4}kT \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \\E_F &= E_{Fi} + kT \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) \\&= E_{Fi} + kT \ln\left(\frac{n_i}{p_0}\right)\end{aligned}$$

1.6 Generation/ Rekombination

Generationsrate:

$$G_{th} = rn_i^2$$

Rekombinationsrate:

$$\begin{aligned}R &= rnp \\&= r(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p)\end{aligned}$$

Nettokombinationsrate:

$$\begin{aligned}U &= R - G_{th} \\&= r(np - n_i^2) \\&= r(p_0\Delta n + n_0\Delta p + \Delta n\Delta p)\end{aligned}$$

1.7 Internes elektrisches Feld

$$E_{int} = \frac{kt\left(\mu_n \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}\right)}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$$

1.8 Kontinuitätsgleichung

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

$$\text{mit: } \Delta p(x,t) = \frac{P_0}{2A} \frac{1}{\sqrt{\pi D_p t}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_p E_0 t)^2}{4D_p t}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

1.9 Ladungsträgerkonzentration

$$\begin{aligned}n_i^2 &= n_0 p_0 \\ p_0 + N_D^+ &= n_0 + N_A^-\end{aligned}$$

intrinsisch:

$$\begin{aligned}n_0 &= \int_{E_C}^{\infty} N_e(E) f(E) dE \\ &\approx N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad \text{mit: } N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \\ &= n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \\ p_0 &= \int_{-\infty}^{E_V} N_h(E) (1 - f(E)) dE \\ &\approx N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad \text{mit: } N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \\ &= n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \\ n_i &= \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \\ &\sim T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)\end{aligned}$$

dotiert:

$$\begin{aligned}n_0 &= n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \\ &= N_C \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_C}{kT}\right) \\ p_0 &= n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \\ &= N_V \exp\left(\frac{E_V - E_{Fi}}{kT}\right)\end{aligned}$$

p-Halbleiter:

$$\begin{aligned}p_0 &= \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \\ &\approx N_A \quad \text{für } N_A \gg N_D \wedge N_A \gg n_i\end{aligned}$$

n-Halbleiter:

$$n_0 = \\ \approx N_D \quad \text{für } N_D \gg N_A \wedge N_D \gg n_i$$

1.10 Lebensdauer

$$\tau = \frac{1}{rn_0}$$

$$\tau = \frac{1}{rp_0}$$

1.11 Poisson-Gleichung

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2\phi}{dx^2} \\ = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_{HL}} \\ \text{mit: } \rho(x, t) = q(p(x) + N_D^+ - n(x) - N_A^-)$$

1.12 Spezifischer Leitwert

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

1.13 Stromdichte

Stromdichte im elektrischen Feld:

$$\vec{J} = q(p\vec{v}_p - n\vec{v}_n) \\ = \underbrace{q(p\mu_p + n\mu_n)}_{\sigma} \vec{E}$$

Diffusionsstromdichte:

$$J(x, t) = q\left(D_n \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} - D_p \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}\right) \\ \text{mit: } D_{n,p} = \frac{kT}{q} \mu_{n,p} = U_T \mu_{n,p}$$

Gesamtstromdichte:

$$\vec{J} = q(p\mu_p + n\mu_n)\vec{E} + q(D_n \text{grad } n - D_p \text{grad } p)$$

1.14 Zustandsdichte

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

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

2 Halbleiterdiode ohne äußere Beschaltung

2.1 Diffusionsspannung

$$U_{\text{Diff}} = \underbrace{\frac{kT}{q}}_{U_T} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

2.2 Elektrisches Feld

$$-x_p \leq x \leq 0 : E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_{HL}\epsilon_0} (x + x_p)$$

$$0 \leq x \leq x_n : E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_{HL}\epsilon_0} (x - x_n)$$

$$\text{sonst : } E(x) = 0$$

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

2.3 Elektrisches Potenzial

$$-x_p \leq x \leq 0 : \phi(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_{HL}\epsilon_0} \frac{(x + x_p)^2}{2}$$

$$0 \leq x \leq x_n : \phi(x) = U_{\text{Diff}} - \frac{qN_D}{\epsilon_{HL}\epsilon_0} \frac{(x - x_n)^2}{2}$$

$$x \leq -x_p : \phi(x) = 0$$

$$x \geq x_n : \phi(x) = U_{\text{Diff}}$$

2.4 Sperrschichtkapazität

$$\begin{aligned}
 C_S &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} A}{w_{RL}} \\
 &= A \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{2(U_{\text{Diff}} - U)}} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}
 \end{aligned}$$

2.5 Raumladungsdichte

$$\begin{aligned}
 -x_p \leq x \leq 0: \quad \rho(x) &= -qN_A^- \\
 0 \leq x \leq x_n: \quad \rho(x) &= qN_D^+ \\
 \text{sonst:} \quad \rho(x) &= 0 \\
 \rho(x, t) &= q(p(x) + N_D^+ - n(x) - N_A^-)
 \end{aligned}$$

2.6 Weite der Raumladungszone

$$\begin{aligned}
 \frac{x_n}{x_p} &= \frac{N_A}{N_D} \\
 w_{RL} &= x_n + x_p \\
 &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} U_{\text{Diff}}}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}
 \end{aligned}$$

n-Gebiet:

$$\begin{aligned}
 x_n &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} U_{\text{Diff}}}{q N_D}} \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} \\
 &= L_{D,n} \sqrt{\frac{2q U_{\text{Diff}}}{kT}} \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} \\
 &= w_{RL} \frac{N_A}{N_A + N_D}
 \end{aligned}$$

p-Gebiet:

$$\begin{aligned}
 x_p &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} U_{\text{Diff}}}{q N_A}} \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D} \\
 &= L_{D,p} \sqrt{\frac{2q U_{\text{Diff}}}{kT}} \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D} \\
 &= w_{RL} \frac{N_D}{N_A + N_D}
 \end{aligned}$$

n⁺p-Übergang:

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_o\varepsilon_{HL}U_{\text{Diff}}}{qN_D}}$$

p⁺n-Übergang:

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_o\varepsilon_{HL}U_{\text{Diff}}}{qN_A}}$$

2.7 Verhalten der Energiebänder

Bandaufwölbung:

$$\Delta E = q(U_{\text{Diff}} - U)$$

Energie aus Potenzial:

$$E = -q\phi$$

Verlauf des Leitungsbandes in der Raumladungszone:

$$\begin{aligned} -x_p \leq x \leq 0 : \quad E_C(x) &= E_C(-\infty) - \frac{q^2 N_A}{\varepsilon_{HL} \varepsilon_0} \frac{(x + x_p)^2}{2} \\ 0 \leq x \leq x_n : \quad E_C(x) &= E_C(-\infty) - qU_{\text{Diff}} + \frac{q^2 N_D}{\varepsilon_{HL} \varepsilon_0} \frac{(x - x_n)^2}{2} \end{aligned}$$

Verlauf des Valenzbandes in der Raumladungszone:

$$E_V(x) = E_C(x) - E_g$$

3 Halbleiterdiode mit äußerer Beschaltung

3.1 Diffusionsstromdichte

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)$$

3.2 Durchbruch

3.2.1 Lawinendurchbruch

$$U_B = 60 \text{ V} \left(\frac{E_g}{1,1 \text{ eV}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{N}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

N ist die Ladungsträgerkonzentration im schwächer dotierten Gebiet.

3.2.2 Tunnelstrom

$$I_T = \frac{\sqrt{2m^*} q^3 E U}{4\pi^2 \hbar^2 E_g^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{\frac{3}{2}}}{3qE\hbar}\right)$$

Sperrsättigungsstromdichte

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

3.3 Generations-/Rekombinationsstromdichte

$$\begin{aligned} J_{G/R} &= \frac{q n_i w_{RL}}{2\tau_{G/R}} \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right) \\ &= J_{G/R,0} \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right) \end{aligned}$$

Generationsstromdichte

$$J_G = -\frac{q n_i w_{RL}}{2\tau_G}$$

Rekombinationsstromdichte

$$J_R = \frac{q n_i w_{RL}}{2\tau_R} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)$$

3.4 Kleinsignalparameter

U_0 ist der Gleichanteil der Spannung; Die Gleichungen gelten nur für niedrige Frequenzen

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

3.5 Quasi-Ferminiveau

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right)$$
$$p = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{kT}\right)$$
$$n \cdot p = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right)$$
$$= n_i^2 \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

Minoritätsträgerdichte:

$$n = \frac{n_i^2}{p} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$
$$= n_{p,0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$
$$p = \frac{n_i^2}{n} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$
$$= p_{n,0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

3.6 Reale Diodenkennlinie

siehe auch Abb.: Dioden-49

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

3.7 Schottkydiode

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)$$

3.8 Sperrschichtkapazität

$$\begin{aligned}C_S &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} A}{w_{RL}} \\ &= A \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{2(U_{\text{Diff}} - U)} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}\end{aligned}$$

n⁺p-Übergang:

$$C_S = A \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL} N_A}{2(U_{\text{Diff}} - U)}}$$

p⁺n-Übergang:

$$C_S = A \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL} N_D}{2(U_{\text{Diff}} - U)}}$$

Diagramm $\frac{1}{C_S^2}$ über U:

- bei $\frac{1}{C_S^2} = 0$ ist $U = U_{\text{Diff}}$

3.9 Weite der Raumladungszone

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

4 MIS-Kondenstor

4.1 Austrittsarbeit des Halbleiters

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

4.1.1 Austrittsarbeitdifferenz Metall-Halbleiter

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

4.2 Bandverbiegung

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

n-Halbleiter:

$$\phi_B = U_T \ln\left(\frac{n_i}{N_D}\right)$$

p-Halbleiter:

$$\phi_B = U_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

4.3 Einsatzspannung

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

4.4 Flachbandspannung

$$U_{FB} = \phi_{MHL} - \frac{Q_{IS}}{C_{IS}}$$

4.5 Ladung in der Raumladungszone

n-Halbleiter:

$$Q_{HL} = \sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN_D|\phi_B|}$$

p-Halbleiter:

$$Q_{HL} = -\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN_A|\phi_B|}$$

4.6 Kapazität

4.6.1 Gesamtkapazität

Verarmung/ schwache Inversion:

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

Starke Inversion bei niedriger Frequenz

$$C = C_{IS}$$

Starke Inversion bei hoher Frequenz

$$\begin{aligned} C_{HL} &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{w_{RL, \max}} \\ &= \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL} N}{4 |\phi_B|}} \end{aligned}$$

4.6.2 Halbleiterkapazität

Verarmung/ schwache Inversion:

$$\begin{aligned} C_{HL} &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{w_{RL}} \\ &= \sqrt{\frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{HL} N}{2 |\phi_S|}} \end{aligned}$$

Starke Inversion:

$$C_{HL} \rightarrow \infty$$

4.6.3 Isolator Kapazität

$$C_{IS} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{is} A}{x_{IS}}$$

4.7 Oberflächenpotential

$$\phi_S = \frac{E_{Fi}(\infty) - E_{Fi}(0)}{q}$$

4.8 Weite der Raumladungszone

Die maximale Weite der Raumladungszone liegt bei $|\phi_S| = |2\phi_B|$ vor.

n-Halbleiter:

$$w_{RL} = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{qN_D} \phi_S} \quad \text{für: } 0 \geq \phi_S \geq -2\phi_B$$

p-Halbleiter:

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL}}{qN_A} \phi_S} \quad \text{für: } 0 \leq \phi_S \leq -2\phi_B$$

5 MOS-Transistor

5.1 Einsatzspannung

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

5.2 Strom-Spannungsbeziehung

5.2.1 n-Kanal

Linearer Bereich:

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

Triodenbereich:

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

Sättigungsbereich:

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

Transkonduktanz:

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

5.2.2 p-Kanal

Linearer Bereich:

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

Triodenbereich:

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

Sättigungsbereich:

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

Transkonduktanz:

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

5.3 Substratsteuerfaktor

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

n-Kanal:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_A}{C_{IS}}}$$
$$Q_{HL} = -\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_A |2\phi_B - U_B|}$$

p-Kanal:

$$\gamma = -\sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_D}{C_{IS}}}$$
$$Q_{HL} = \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{HL} q N_D |2\phi_B - U_B|}$$

5.4 Unterschwellenstrom

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

6 Wichtige Konstanten

$$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$
$$m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$
$$\frac{e}{m_e} = 1,75881962 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$
$$k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$
$$kT \stackrel{300\text{K}}{=} 4,141974 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$
$$U_T \stackrel{300\text{K}}{=} 25,852157 \text{ mV}$$