

# Mikroelektronik Formelsammlung

Florian Leuze

# 1 Inhalt

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><u>Inhalt</u></b>	<b>2</b>
1.1	Versionierung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Mikroelektronik I</b>	<b>4</b>
2.1	Leitfähigkeit und Energiebänder . . . . .	4
2.1.1	Spezifischer Widerstand . . . . .	4
2.1.2	Energiebänder . . . . .	4
2.1.3	Siliciumkristalle . . . . .	5
2.2	Elektronen und Löcher in Halbleitern . . . . .	5
2.2.1	Energie . . . . .	5
2.2.2	Elektrisches Feld . . . . .	5
2.2.3	Differentielles Ohmsches Gesetz . . . . .	5
2.2.4	Gesamtleitfähigkeit . . . . .	6
2.2.5	Ladungsträgerkonzentration in den Bändern . . . . .	6
2.2.6	Fermi-Dirac-Verteilung . . . . .	6
2.2.6.1	Boltzmann-Näherung . . . . .	7
2.2.6.2	Ladungsträgerkonzentration in der Boltzmann-Näherung . . . . .	7
2.2.7	Massenwirkungsgesetz . . . . .	7
2.2.7.1	Umformulierungen . . . . .	8
2.2.8	Fermi-Niveau . . . . .	8
2.2.8.1	Umformulierungen . . . . .	8
2.2.9	Bandbesetzung im intrinsischen Halbleiter . . . . .	8
2.2.10	Bandbesetzung im extrinsischen Halbleiter . . . . .	9
2.2.10.1	Wichtige Näherung zur Bestimmung der Minoritäten	9
2.3	Ströme im Halbleiter . . . . .	9
2.3.1	Driftstrom . . . . .	9
2.3.2	Beweglichkeit . . . . .	9
2.3.3	Partikelstromdichte . . . . .	9
2.3.4	Diffusionsstromdichte . . . . .	10
2.3.5	Einsteingleichung . . . . .	10
2.3.6	Gesamtstrom im Halbleiter . . . . .	10
2.3.7	Rekombination und Generation . . . . .	10
2.3.7.1	Niederinjektion . . . . .	11
2.3.7.2	Minoritätsladungsträgerlebensdauer/ -diffusionslänge . . . . .	11
2.3.8	Quasi-Fermi-Niveaus (QFN oder Imref) . . . . .	12
2.4	Elektrostatik des PN-Übergangs . . . . .	12
2.4.1	Poisson-Gleichung . . . . .	12
2.4.2	Ladungsneutralität und elektrostatisches Helebggesetz . . . . .	13

2.4.3	Potential und Feldstärke . . . . .	13
2.4.4	Diffusionsspannung und Weite der RLZ . . . . .	14
2.5	Kennlinie des pn-Übergangs . . . . .	15
2.5.1	Kapazität des pn-Übergangs . . . . .	16
2.5.2	Kleinsignalleitwert des pn-Übergangs . . . . .	16
2.5.3	Abweichung in der Vorwärtskennlinie . . . . .	16
2.5.3.1	Rekombinationsströme . . . . .	16
2.5.3.2	Idealität . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Anhänge</b>	<b>18</b>
3.1	Abkürzungen/Formelzeichen . . . . .	18
3.2	Wichtige Donatoren und Akzeptoren . . . . .	20
3.3	Effektive Massen . . . . .	21
3.4	Bandlücken wichtiger Materialien . . . . .	21
3.5	Eckdaten wichtiger Halbleiter . . . . .	21
3.6	Niederfeld- und Niederdotierungsbeweglichkeiten ( $T = 300K$ ) . . . . .	21
3.7	Konstanten . . . . .	22
3.8	Nachwort . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>23</b>

## 1.1 Versionierung

Datum	Vers.	Kürzel	Änderung
04.05.2018	0.1	FL	Erzeugung Dokument; Erzeugung Inhaltsverzeichnis; Erzeugung Versionierung; Erzeugung Leitf. u. Energieb.
05.05.2018	0.1	FL	Korrektur formTabL
06.05.2018	0.1	FL	Erzeugung Elek. u. Löch. in Halbl.; Erzeugung Abk; Donatoren u. Akzeptoren; Eff. Massen; Bandl.; Eckd.; u. Konst.
12.05.2018	1.0	FL	Komplette Neustrukturierung; Fertigstellung Inhalt

## 2 Mikroelektronik I

Im Folgenden sei  $U = V$ .

### 2.1 Leitfähigkeit und Energiebänder

#### 2.1.1 Spezifischer Widerstand

$$\begin{array}{ll} \text{Ohmsches} & \\ \text{Gesetz} & : \quad V = RI \text{ [V]} \end{array} \quad (2.1.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Widerstand} & : \quad R = \frac{V}{I} \text{ [\Omega]} \end{array} \quad (2.1.2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Leitwert} & : \quad G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \text{ [\frac{1}{\Omega} = S]} \end{array} \quad (2.1.3)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Spezifischer} & \\ \text{Widerstand} & : \quad R = \rho \frac{L}{A} \text{ [\Omega]} \end{array} \quad (2.1.4)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Leitfähigkeit(a)} & : \quad \sigma \frac{A}{L} \text{ [S]} \end{array} \quad (2.1.5)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Leitfähigkeit(b)} & : \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \end{array} \quad (2.1.6)$$

#### 2.1.2 Energiebänder

$$\begin{array}{ll} \text{Wellenlänge} & : \quad \frac{ch}{E} = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{f} \end{array} \quad (2.1.7)$$

Mit  $h$  als Plancksches Wirkungsquantum,  $c$  als Lichtgeschwindigkeit (siehe 3.7) und  $\nu$  hier als Frequenz (siehe 3.1).

$$\begin{array}{ll} \text{Photonenenergie} & : \quad \frac{1,240}{\lambda[\mu m]} = \frac{hc}{\lambda} \text{ [eV]} \end{array} \quad (2.1.8)$$

$h$  ist hier in  $eV$  einzusetzen.

$$\begin{array}{ll} \text{Ionisierungs-} & \\ \text{energie der i-ten} & : \quad E_i = -\frac{m_0 q^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 i^2} \sim \frac{m_0}{(\varepsilon_0)^2} \end{array} \quad (2.1.9)$$

Schale

Gegebenenfalls muss  $m_0$  mit der effektiven Masse multipliziert werden.

$$\begin{array}{ll} \text{Radien der} & \\ \text{Energieniveaus} & : \quad r_i = \frac{\varepsilon_0 i^2 h^2}{q^2 \pi m_0} \end{array} \quad (2.1.10)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Aufzubringende} & \\ \text{Energie} & : \quad E_f = |E_i - E_j| = \left| \frac{m_0 q^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right) \right| \end{array} \quad (2.1.11)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Größengleichung} & \\ \text{zu (2.1.11)} & : \quad E_f = \left| \frac{9,11 kg (1,602 As)^4}{8 (8,885 \frac{As}{\sqrt{m}} 6,633 s)^2} \cdot 10^{-15} \left( \frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right) \right| \end{array} \quad (2.1.12)$$

### 2.1.3 Siliciumkristalle

$$\begin{array}{ll} \text{Atomdichte} & : \\ \text{Silizium} & : \quad N_{Si} = \frac{\text{Atomzahl}}{\text{Volumen}} = \frac{n_{cell}}{a^3} \end{array} \quad (2.1.13)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Größenwert zu} & : \\ (2.1.13) & : \quad = \frac{8}{(5,43 \cdot 10^{-8} \text{cm})^3} = 5,00 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3} \end{array} \quad (2.1.14)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Atomdichte Si} & : \\ \text{Valenzelektr.} & : \quad N_{val} = 4N_{Si} = 2,00 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{cm}^3} \end{array} \quad (2.1.15)$$

Im Folgenden sei  $EZ$  eine Einheitszelle.

$$\begin{array}{ll} \text{Atomanzahl} & : \\ \text{Einheitszelle Si} & : \quad n_{cell} = \frac{8 \text{in Ecken}}{8EZ} + \frac{6 \text{in Flächen}}{2EZ} + \frac{4 \text{im Volumen}}{1EZ} \end{array} \quad (2.1.16)$$

## 2.2 Elektronen und Löcher in Halbleitern

### 2.2.1 Energie

Im Folgenden sei  $E_c$  die Leitungsbandkante und  $E_v$  die Valenzbandkante.

$$E = E_c \quad : \quad E_{pot} = E_c \text{ und } E_{kin} = 0 \quad (2.2.1)$$

$$E > E_c \quad : \quad E_{pot} = E_c \text{ und } E_{kin} = \frac{1}{2}m_n^*v^2 \quad (2.2.2)$$

$$E = E_v \quad : \quad E_{pot} = E_v \text{ und } E_{kin} = 0 \quad (2.2.3)$$

$$E < E_c \quad : \quad E_{pot} = E_v \text{ und } E_{kin} = \frac{1}{2}m_p^*v^2 \quad (2.2.4)$$

$$\text{Therm. Energie} \quad : \quad E_{th} = E_{kin} = \frac{1}{2}m_o v_{th}^2 \cdot 1.08 = \frac{3}{2}kT [J] \quad (2.2.5)$$

### 2.2.2 Elektrisches Feld

$$\text{El. Feld(a)} \quad : \quad \epsilon = -\frac{d\varphi}{dx} = -\left(-\frac{1}{q} \frac{dE_{pot}}{dx}\right) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (2.2.6)$$

Mit  $i$  als Platzhalter für  $c$  oder  $v$ .

### 2.2.3 Differentielles Ohmsches Gesetz

$$\text{El. Feld(b)} \quad : \quad \epsilon = \frac{V}{l} \left[ \frac{V}{cm} \right] \quad (2.2.7)$$

$$\text{Stromdichte} \quad : \quad J = \frac{I}{A} \left[ \frac{A}{cm^2} \right] \quad (2.2.8)$$

Mit (2.1.5) folgt:

$$\text{Leitfähigkeit(c)} \quad : \quad \sigma = G \frac{l}{A} = \frac{I \cdot l}{V \cdot A} = \frac{J}{\epsilon} \quad (2.2.9)$$

$$\text{Driftstromdichte} \quad : \quad J_{drift} = \sigma \epsilon = \rho_e v_d = q n v_d \quad (2.2.10)$$

Wobei  $\rho_e$  die Ladungsdichte und  $v_d$  die Driftgeschwindigkeit sind. Damit folgt

$$\text{Leitfähigkeit(d)} \quad : \quad \sigma = q n \frac{v_d}{\epsilon} \quad (2.2.11)$$

$$\text{Beweglichkeit} \quad : \quad \mu = \frac{v_d}{\epsilon} \left[ \frac{cm^2}{Vs} \right] \quad (2.2.12)$$

$$\text{Leitfähigkeit(f)} \quad : \quad \sigma = q \mu n \quad (2.2.13)$$

### 2.2.4 Gesamtleitfähigkeit

$$\begin{array}{ll} \text{Gesamtleitfähigkeit} & : \quad \sigma_{ges} = \sigma_n + \sigma_p = q\mu_n n + q\mu_p p \end{array} \quad (2.2.14)$$

### 2.2.5 Ladungsträgerkonzentration in den Bändern

$$\begin{array}{ll} \text{Zustandsdichte} & \\ \text{Leitungsband} & : \quad D_C(E) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_n^*)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_c} \end{array} \quad (2.2.15)$$

Die in (2.2.15) formulierte Gleichung ist als Zustandsdichte pro Energieintervall zu verstehen.

$$\begin{array}{ll} \text{Größengleichung} & \\ \text{zu (2.2.15)} & : \quad D_C(E) = 6,8 \cdot 10^{21} \left( \frac{m_n^*}{m_o} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{(E - E_c) [eV]} \left[ \frac{1}{eVcm^3} \right] \end{array} \quad (2.2.16)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Größengleichung} & \\ \text{zu (2.2.15) im} & : \quad D_C(E) = 6,8 \cdot 10^{21} \left( \frac{m_p^*}{m_o} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{(E_v - E) [eV]} \left[ \frac{1}{eVcm^3} \right] \\ \text{Valenzband} & \end{array} \quad (2.2.17)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Elektronenkon-} & \\ \text{zentration} & : \quad n = \int_{E_c}^{\infty} D_c(E) \cdot f(E) dE \end{array} \quad (2.2.18)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Löcherkonzen-} & \\ \text{tration} & : \quad p = \int_{-\infty}^{E_v} D_v(E) f_h(E) dE \end{array} \quad (2.2.19)$$

mit  $f(E)$  als Besetzungswahrscheinlichkeit.

### 2.2.6 Fermi-Dirac-Verteilung

$$\begin{array}{ll} \text{Fermi-Dirac-} & \\ \text{Verteilung(a)} & : \quad f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1} \end{array} \quad (2.2.20)$$

Mit  $E_F$  als Fermi Energie.

$$E = E_F \quad : \quad f(E = E_F) = \frac{1}{2} \quad (2.2.21)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Fermi-Dirac-} & \\ \text{Verteilung(b)} & : \quad f(E) := f_e(E) \end{array} \quad (2.2.22)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Fermi-Dirac-} & \\ \text{Verteilung(c)} & : \quad f_h(E) = 1 - f_e(E) \end{array} \quad (2.2.23)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Fermi-Dirac-} & \\ \text{Verteilung(d)} & : \quad f_h(E) + f_e(E) = 1 \end{array} \quad (2.2.24)$$

### 2.2.6.1 Boltzmann-Näherung

$$\begin{array}{l} \text{Boltzmann-} \\ \text{Näherung(a)} \end{array} : f_{e,Boltz}(E) = e^{-\frac{E - E_F}{kT}} \quad (2.2.25)$$

Die Boltzmann-Näherung ist nur für den Fall  $E - E_f > 3kT$  zureichend genau.

$$E - E_F \gg kT : f_h(E) = 1 - f_e(E) \cong 1 \quad (2.2.26)$$

$$E_F - E \gg kT : f_e(E) = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1} \cong 1 \quad (2.2.27)$$

$$\begin{array}{l} \text{Prozentualer} \\ \text{Fehler der} \\ \text{Boltzmann-} \\ \text{Näherung} \end{array} : F_{boltz,\%} = \frac{f(\Delta E) - f_{boltz}(\Delta E)}{f(\Delta E)} \quad (2.2.28)$$

### 2.2.6.2 Ladungsträgerkonzentration in der Boltzmann-Näherung

$$\begin{array}{l} \text{Elektronenkon-} \\ \text{zentration} \end{array} : n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \quad (2.2.29)$$

$$\begin{array}{l} \text{Lochkonzentra-} \\ \text{tion} \end{array} : p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} \quad (2.2.30)$$

$$\begin{array}{l} \text{Effektive Zu-} \\ \text{standsichte(a)} \end{array} : N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sim (m_n^* T)^{\frac{3}{2}} \quad (2.2.31)$$

$$\begin{array}{l} \text{Effektive Zu-} \\ \text{standsichte(b)} \end{array} : N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sim (m_p^* T)^{\frac{3}{2}} \quad (2.2.32)$$

$$\begin{array}{l} \text{Größengleichung} \\ \text{zu (2.2.31) und} \\ \text{(2.2.32)} \end{array} : N_{C,V} = 2,50 \cdot 10^{19} \left( \frac{m_{n,p}^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{T[K]}{300} \right)^{\frac{3}{2}} [cm^{-3}] \quad (2.2.33)$$

### 2.2.7 Massenwirkungsgesetz

$$\begin{array}{l} \text{Massenwir-} \\ \text{kungsgesetz(a)} \end{array} : np = N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} \quad (2.2.34)$$

$$\text{Bandlücke} : E_g = E_C - E_V \quad (2.2.35)$$

(2.2.35) in (2.2.34) (wobei  $n_i$  die intrinsische Ladungsträgerdichte ist):

$$\begin{array}{l} \text{Massenwir-} \\ \text{kungsgesetz(b)} \end{array} : np = N_C N_V e^{\frac{E_g}{kT}} = n_i^2 \quad (2.2.36)$$

Also gilt ganz allgemein (und zwar unabhängig von der Dotierung)

$$\begin{array}{l} \text{Massenwir-} \\ \text{kungsgesetz(c)} \end{array} : np = n_i^2 \quad (2.2.37)$$

$$\begin{array}{l} \text{Intrinsische} \\ \text{Ladungsträger-} \\ \text{dichte} \end{array} : ni = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2.2.38)$$

### 2.2.7.1 Umformulierungen

$$E_C - E_F : E_C - E_F = kT \cdot \ln\left(\frac{N_C}{n}\right) \quad (2.2.39)$$

$$E_F - E_V : E_F - E_V = kT \cdot \ln\left(\frac{N_V n}{n_i^2}\right) \quad (2.2.40)$$

### 2.2.8 Fermi-Niveau

$$\text{Fermi-Niveau(a)} : E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \quad (2.2.41)$$

Mit (2.2.31) und (2.2.32) in (2.2.41) folgt:

$$\text{Fermi-Niveau(b)} : E_{fi} = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{3}{4} kT \cdot \ln\left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \quad (2.2.42)$$

#### 2.2.8.1 Umformulierungen

$$|E_{Fi} - E_V| = \frac{E_g}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \quad (2.2.43)$$

$$\begin{aligned} E_C = E_F + E_g &\Rightarrow \frac{E_C + E_V}{2} \\ &= \frac{E_V + E_g + E_V}{2} = E_V + \frac{E_g}{2} \stackrel{Ev: \equiv 0V}{=} \frac{E_g}{2} \end{aligned} \quad (2.2.44)$$

$$\begin{aligned} E_g = E_C - E_V &= (E_C - E_F) + (E_F - E_V) \\ \Rightarrow E_C - E_F &= E_g - (E_F - E_V) \end{aligned} \quad (2.2.45)$$

### 2.2.9 Bandbesetzung im intrinsischen Halbleiter

Definiert man

$$n_e = D_C(E) f(E) dE \quad (2.2.46)$$

wo  $n_e$  die Elektronenkonzentration pro Energieintervall beschreibt erhält man aus (2.2.18)

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n_e dE \quad (2.2.47)$$

bzw. mit  $p_e = D_V(E)(1 - f(E))$  aus (2.2.19)

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} p_e dE \quad (2.2.48)$$



### 2.2.10 Bandbesetzung im extrinsischen Halbleiter

Aus der Annahme, dass alle Donatoren und Akzeptoren ionisiert seien, folgt

$$N_D^+ \approx N_D \quad N_A^- \approx N_A \quad (2.2.49)$$

Aus der Ladungsneutralität und (2.2.37) folgt

$$n = \frac{N_D^+ - N_A^-}{2} + \sqrt{\frac{(N_D^+ - N_A^-)^2}{4} + n_i^2} \quad (2.2.50)$$

#### 2.2.10.1 Wichtige Näherung zur Bestimmung der Minoritäten

Beispiel an einem n-typ Halbleiter: Mit (2.2.49) und

$$N_D \gg N_A, \quad N_D \gg n_i \quad (2.2.51)$$

folgt dann:

$$n \approx N_D \quad (2.2.52)$$

Mit (2.2.37) lassen sich so die Minoritäten bestimmen

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.2.53)$$

## 2.3 Ströme im Halbleiter

### 2.3.1 Driftstrom

**Def.:** Erfolgt die Ladungsträgerbewegung als Folge einer elektrischen Feldstärke, so spricht man im Halbleiter von einem Driftstrom.

$$\begin{array}{ll} \text{Driftstrom} & \\ \text{Elektronen} & : \quad J_{drift,n} = q\mu_n n \mathcal{E} = \sigma_n \mathcal{E} \left[ \frac{A}{m^2} \right] \end{array} \quad (2.3.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Driftstrom} & \\ \text{Löcher} & : \quad J_{drift,p} = q\mu_p p \mathcal{E} = \sigma_p \mathcal{E} \end{array} \quad (2.3.2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Gesamtdrift-} & \\ \text{strom} & : \quad J_{drift} = J_{drift,n} + J_{drift,p} = (\sigma_n + \sigma_p) \mathcal{E} = \frac{V}{l_p} \end{array} \quad (2.3.3)$$

### 2.3.2 Beweglichkeit

$$\begin{array}{ll} \text{Drift-} & \\ \text{geschwindigkeit } n & : \quad v_{d,n} = -\mu_n \mathcal{E} \end{array} \quad (2.3.4)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Drift-} & \\ \text{geschwindigkeit } p & : \quad v_{d,p} = +\mu_p \mathcal{E} \end{array} \quad (2.3.5)$$

### 2.3.3 Partikelstromdichte

$$\begin{array}{ll} \text{Partikelstrom-} & \\ \text{dichte} & : \quad J_{part}(x) = -D \frac{dM}{dx} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \end{array} \quad (2.3.6)$$

### 2.3.4 Diffusionsstromdichte

$$\begin{array}{ll} \text{Diffusionsstrom-} & \\ \text{dichte(a)} & : \quad J_{diff} = qJ_{part} \end{array} \quad (2.3.7)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Diffusions-} & \\ \text{stromdichte } n & : \quad J_{diff,n} = -qJ_{part} = -q \left( -D_n \frac{dn}{dx} \right) = qD_n \frac{dn}{dx} \end{array} \quad (2.3.8)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Diffusions-} & \\ \text{stromdichte } p & : \quad J_{diff,p} = qJ_{part} = q \left( -D_p \frac{dp}{dx} \right) = -qD_p \frac{dp}{dx} \end{array} \quad (2.3.9)$$

### 2.3.5 Einsteingleichung

$$\begin{array}{ll} \text{Diffusions-} & \\ \text{konstante } n & : \quad D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \end{array} \quad (2.3.10)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Diffusions-} & \\ \text{konstante } p & : \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \end{array} \quad (2.3.11)$$

$kT$  ist jeweils in Joule einzusetzen. Liegt der Wert von  $kT$  in  $eV$  vor, muss auf das normieren auf die Elementarladung verzichtet werden!

### 2.3.6 Gesamtstrom im Halbleiter

$$\begin{array}{ll} \text{Elektronen-} & \\ \text{stromdichte} & : \quad J_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} = \sigma_n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} \end{array} \quad (2.3.12)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Löcher-} & \\ \text{stromdichte} & : \quad J_p = q\mu_p p \mathcal{E} + qD_p \frac{dp}{dx} = \sigma_p \mathcal{E} + qD_p \frac{dp}{dx} \end{array} \quad (2.3.13)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Gesamtstrom-} & \\ \text{dichte} & : \quad J_{tot} = J_n + J_p \end{array} \quad (2.3.14)$$

$$= J_{drift,n} + J_{diff,n} + J_{drift,p} + J_{diff,p}$$

In den meisten Bauelementen kann die Driftstromdichte für Minoritäten vernachlässigt werden.

### 2.3.7 Rekombination und Generation

$$\begin{array}{ll} \text{Injektion von} & \\ \text{Ladungsträgern} & : \quad np > n_i^2 \end{array} \quad (2.3.15)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Extraktion von} & \\ \text{Ladungsträgern} & : \quad np < n_i^2 \end{array} \quad (2.3.16)$$

### 2.3.7.1 Niederinjektion

$$\begin{array}{l} \text{Lochkonzentra-} \\ \text{tion vor} \\ \text{Injektion} \end{array} : p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 10^5 \text{ cm}^{-3} \quad (2.3.17)$$

Niederinjektion bedeutet, dass sich die Majoritätenkonzentration während dem Betreiben des Bauelements (praktisch) nicht ändert. (Vgl. Werner 2017)

$$\begin{array}{l} \text{Näherung} \\ \text{Minoritäten} \end{array} : p \approx \Delta p \quad (2.3.18)$$

$$\begin{array}{l} \text{Näherung} \\ \text{Majoritäten} \end{array} : n \approx n_0 \quad (2.3.19)$$

„PN-Übergänge, npn- und pnp Transistoren, Thyristoren, etc. betreibt man normalerweise im Bereich der Niederinjektion.“ (Werner 2017)

### 2.3.7.2 Minoritätsladungsträgerlebensdauer/ -diffusionslänge

$$\begin{array}{l} \text{Minoritätsla-} \\ \text{dungsträgerle-} \\ \text{bensdauer} \end{array} : \Delta p(t) = \Delta p(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (2.3.20)$$

Wobei  $\tau = \frac{1}{K_1}$  den zeitlichen Abfall von p charakterisiert und Minoritätsladungsträgerlebensdauer heißt. (Vgl. Werner 2017)

$$\Rightarrow \tau = \left. \frac{\Delta p}{\frac{d\Delta p}{dt}} \right|_{t=0} \quad (2.3.21)$$

$$\begin{array}{l} \text{Minoritätsla-} \\ \text{dungsträgerdif-} \\ \text{fusionslänge} \end{array} : \Delta p(x) = \Delta p(x_0) e^{-\frac{x-x_0}{L}} \quad (2.3.22)$$

Wobei  $L = \frac{1}{K_2}$  den räumlichen Abfall der Überschusskonzentration charakterisiert und Minoritätsladungsträgerdiffusionslänge heißt. (Vgl. Werner 2017)

$$\begin{array}{l} \text{Diffusionslänge} \\ \text{Löcher} \end{array} : L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.3.23)$$

$$\begin{array}{l} \text{Diffusionslänge} \\ \text{Elektronen} \end{array} : L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (2.3.24)$$

### 2.3.8 Quasi-Fermi-Niveaus (QFN oder Imref)

Liegt Injektion oder Extraktion vor, also gilt  $np > n_i^2$  oder  $np < n_i^2$ , gelten die Zusammenhänge aus (2.2.36) nicht mehr, da hier ein gleiches Fermi-Niveau für Löcher und Elektronen vorausgesetzt wird. Um das zu korrigieren werden für Löcher und Elektronen Quasifermi-niveaus eingeführt.

$$\begin{array}{ll} \text{Elektronenkon-} & \\ \text{zentration} & : \quad n = N_C e^{-\frac{E_C - E_{Fn}}{kT}} \end{array} \quad (2.3.25)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Lochkonzentra-} & \\ \text{tion} & : \quad p = N_V e^{-\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}} \end{array} \quad (2.3.26)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Massenwir-} & \\ \text{kungsgesetz(b)} & : \quad np = N_C N_V e^{\frac{E_g}{kT}} e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}} \\ & = n_i^2 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}} \end{array} \quad (2.3.27)$$

Es gilt:

$$\text{Gleichgewicht} \quad : \quad np = n_i^2 \Leftrightarrow E_{Fn} = E_{Fp} = E_F \quad (2.3.28)$$

$$\text{Injektion} \quad : \quad np > n_i^2 \Leftrightarrow E_{Fn} > E_{Fp} \quad (2.3.29)$$

$$\text{Extraktion} \quad : \quad np < n_i^2 \Leftrightarrow E_{Fn} < E_{Fp} \quad (2.3.30)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Elektronen-} & \\ \text{stromdichte} & : \quad J_n(x) \stackrel{(2.3.12),(2.2.29)}{=} \sigma_n(x) \frac{1}{q} \frac{dE_{Fn}}{dx} \end{array} \quad (2.3.31)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Löcherstrom-} & \\ \text{dichte} & : \quad J_p(x) \stackrel{(2.3.13),(2.2.30)}{=} \sigma_p(x) \frac{1}{q} \frac{dE_{Fp}}{dx} \end{array} \quad (2.3.32)$$

## 2.4 Elektrostatik des PN-Übergangs

### 2.4.1 Poisson-Gleichung

$$\begin{array}{ll} \text{Poisson-} & \\ \text{Gleichung} & : \quad \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_d} \end{array} \quad (2.4.1)$$

Mit  $\varphi(x)$  als Potential und  $\rho_Q(x)$  als räumliche Ladungsdichte.

$$\begin{array}{ll} \text{Dielektrizitäts-} & \\ \text{konstante} & : \quad \varepsilon_d = \varepsilon_r \varepsilon_0 \end{array} \quad (2.4.2)$$

Mit

$$\begin{array}{ll} \text{Potentielle} & \\ \text{Energie(a)} & : \quad \varphi(x) = -\frac{1}{q} E_{pot}(x) \end{array} \quad (2.4.3)$$

folgt

$$\begin{array}{lcl} \text{Potentielle} & & \\ \text{Energie(b)} & : & \frac{1}{q} \frac{d^2 E_{pot}(x)}{dx^2} = \frac{\rho_Q(x)}{\varepsilon_d} \end{array} \quad (2.4.4)$$

Mit (2.2.6) und (2.4.1) folgt

$$\begin{array}{lcl} \text{differentielles} & & \\ \text{El. Feld} & : & \frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{\rho_Q(x)}{\varepsilon_d} \end{array} \quad (2.4.5)$$

### 2.4.2 Ladungsneutralität und elektrostatistisches Helebggesetz

$$\begin{array}{lcl} \text{Verarmungs-} & & \\ \text{herung} & : & \rho_Q(x) = \begin{cases} -qN_A & \text{für } -d_p \leq x < 0 \\ +qN_D & \text{für } 0 < x \leq d_n \end{cases} \end{array} \quad (2.4.6)$$

Wobei sich der pn-Übergang zwischen  $-d_p$  und  $d_n$  befindet und somit  $-d_p$  und  $d_n$  die Grenzen der RLZ darstellen.

$$\begin{array}{lcl} \text{Flächenladungs-} & & \\ \text{dicke links v.} & : & Q_L = \rho_L d_p = -qN_A d_p \\ \text{pn-Übergang} & & \end{array} \quad (2.4.7)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Flächenladungs-} & & \\ \text{dicke rechts v.} & : & Q_R = \rho_R d_n = +qN_D d_n \\ \text{pn-Übergang} & & \end{array} \quad (2.4.8)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Flächenladung} & & \\ \text{gesamt} & : & G_{F,total} = Q_L + Q_R = 0 \\ & & = -qN_A d_p + qN_D d_n \end{array} \quad (2.4.9)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Folgerung aus} & & \\ \text{(2.4.9)(a)} & : & N_A d_p = N_D d_n \end{array} \quad (2.4.10)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Folgerung aus} & & \\ \text{(2.4.9)(b)} & : & \frac{d_p}{d_n} = \frac{N_D}{N_A} \end{array} \quad (2.4.11)$$

### 2.4.3 Potential und Feldstärke

$$\begin{array}{lcl} \text{Elektrische} & & \\ \text{Feldstärke(a1)} & : & \mathcal{E}_L(x) = -\frac{q}{\varepsilon_d} N_A (x + d_p) \end{array} \quad (2.4.12)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Elektrische} & & \\ \text{Feldstärke(b2)} & : & \mathcal{E}_R(x) = \frac{q}{\varepsilon_d} N_D (x - d_n) \end{array} \quad (2.4.13)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Maximale el.} & & \\ \text{Feldstärke(a)} & : & \mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_{L,R}(x=0) \end{array} \quad (2.4.14)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Elektrische} & & \\ \text{Feldstärke(a2)} & : & \mathcal{E}_L(x) = \mathcal{E}_{max} \left(1 + \frac{x}{d_p}\right) \text{ für } -d_p \leq x \leq 0 \end{array} \quad (2.4.15)$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Elektrische} & & \\ \text{Feldstärke(b2)} & : & \mathcal{E}_R(x) = \mathcal{E}_{max} \left(1 - \frac{x}{d_n}\right) \text{ für } 0 \leq x \leq d_n \end{array} \quad (2.4.16)$$

#### 2.4.4 Diffusionsspannung und Weite der RLZ

$$\text{Weite(a)} : w = d_n + d_p \quad (2.4.17)$$

$$\text{Diffusionsspannung(a)} : V_{bi} = \varphi_R(d_n) = -\frac{\epsilon_{max}}{2}(d_n + d_p) = -\frac{\epsilon_{max}}{2}w \quad (2.4.18)$$

Mit (2.4.14) erhält man

$$\text{Diffusionsspannung(b)} : V_{bi} = \frac{qN_A}{2\epsilon_d}d_p(d_n + d_p) \quad (2.4.19)$$

Mit (2.4.10) erhält man schließlich

$$\text{Teilweite } d_p : d_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_d N_D V_{bi}}{qN_A(N_A + N_D)}} \sim \sqrt{V_{bi}} \quad (2.4.20)$$

$$\text{Weite(b)} : w = d_p \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right) \quad (2.4.21)$$

$$\text{Weite(c)} : w = \sqrt{\frac{2\epsilon_d}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} V_{bi}} \sim \sqrt{V_{bi}} \quad (2.4.22)$$

$$\text{Folgerung(a)} : w \uparrow \Rightarrow V_{bi} \uparrow \quad (2.4.23)$$

$$\text{Diffusionsspannung(c)} : qV_{bi} = kT \ln \left( \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} \right) \approx kT \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.4.24)$$

$$\text{Diffusionsspannung(d)} : V_{bi}^0 = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (2.4.25)$$

$$\text{Diffusionsspannung(e)} : V_{bi} = V_{bi}^0 - V \quad (2.4.26)$$

Aus (2.4.10) und (2.4.17) folgen

$$\text{Relative Weite } p : d_p = w \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.4.27)$$

$$\text{Relative Weite } n : d_n = w \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.4.28)$$

$$\text{Maximale el. Feldstärke(b)} : |\epsilon_{max}| = 2 \frac{V_{bi}}{w} \quad (2.4.29)$$

$$\begin{aligned} \text{Flächenladungsdichte} : Q_F = |Q_R| = |Q_L| &= qN_A d_p = qN_D d_n \\ &= q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} w = \sqrt{2\epsilon_d \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} q V_{bi}} \end{aligned} \quad (2.4.30)$$

## 2.5 Kennlinie des pn-Übergangs

$$\text{Minoritätenkonzentration(a)} : \Delta p|_{d_n} = p_n - p_{n0} = p_{n0} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.1)$$

$$\text{Minoritätenkonzentration(b)} : \Delta n|_{-d_p} = n_p - n_{p0} = p_{n0} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.2)$$

$$\text{Stromdichte } n : J_n(-d_p) = J_{n0} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.3)$$

$$\text{Stromdichte } p : J_p(d_n) = J_{p0} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.4)$$

$$\text{Bandlücke} : E_g = -\frac{\ln(J_0(T_4)) - \ln(J_0(T_2))}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (2.5.5)$$

$$\text{Stromdichte(a)} : J = \left( \frac{qD_n}{L_n} n_{p0} + \frac{qD_p}{L_p} p_{n0} \right) \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.6)$$

Mit  $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$  und  $n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$  folgt

$$\text{Stromdichte(b)} : J = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.7)$$

Die e-Funktion wird bei negativen Spannungen sehr klein, das impliziert direkt einen sehr kleinen Stromfluss beim Sperrverhalten. Bei einer großen Bandlücke erhält man so ein sehr gutes Sperrverhalten.

$$\text{Sperrsättigungsstromdichte} : J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.5.8)$$

$$\text{Stromdichte(c)} : J = J_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.9)$$

$$\text{Elektronensperr-sättigungsstromdichte} : J_{no} = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad (2.5.10)$$

$$\text{Löchersperr-sättigungsstromdichte} : J_{po} = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.5.11)$$

Bei stark unsymmetrischer Dotierung wird die Sperrsättigungsstromdichte ebenso stark unsymmetrisch und es kann vereinfacht werden. Im Fall  $N_A \gg N_D$  z.B:

$$\text{Näherung(a)} : J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.5.12)$$

$$\text{Näherung(b)} : J = \frac{qD_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5.13)$$

### 2.5.1 Kapazität des pn-Übergangs

$$\text{Kapazität(a)} : C = \frac{dQ}{dW} \quad (2.5.14)$$

$$\text{Kapazität(b)} : C_{\text{platt}} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{w} = \varepsilon_d \frac{A}{w} \quad (2.5.15)$$

$$\text{Kapazität der RLZ(a)} : C_{RLZ} = A \sqrt{\frac{q\varepsilon_d}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \sqrt{\frac{1}{V_{bi}^0 - V}} \quad (2.5.16)$$

Mit (2.4.26) folgt

$$\text{Kapazität der RLZ(b)} : C_{RLZ} = A \frac{\varepsilon_d}{\sqrt{\frac{q\varepsilon_d}{2} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} V_{bi}}} \quad (2.5.17)$$

Setzt man weiter (2.4.22) ein erhält man schließlich

$$\text{Kapazität der RLZ(c)} : C_{RLZ} = A \frac{\varepsilon_d}{w} \quad (2.5.18)$$

$$\text{Diffusionskapazität der Minoritäten} : C_{diff} = \frac{dQ_{min}}{dV} = A \frac{q^2}{kT} L_p p_{n0} e^{\frac{qV}{kT}} \quad (2.5.19)$$

### 2.5.2 Kleinsignalleitwert des pn-Übergangs

$$\text{Kleinsignalleitwert} : G_d = \frac{dI}{dV} = A \frac{dJ}{dV} \quad (2.5.20)$$

$$\text{Differenzieller Leitwert} : G_d = A \frac{dJ}{dV} = A \frac{q}{kT} J \quad (2.5.21)$$

### 2.5.3 Abweichung in der Vorwärtsskennlinie

#### 2.5.3.1 Rekombinationsströme

$$\text{Rekombinationssperresättigungsstrom} : J_{ro} = q n_i \frac{w}{2\tau_{RLZ}} \quad (2.5.22)$$

$$\text{Rekombinationsstrom} : J_r = J_{ro} \left( e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right) \quad (2.5.23)$$

$$\text{Totale Stromdichte(a)} : J_t = J_0 \left( \frac{qV}{kT} - 1 \right) + J_{ro} \left( \frac{qV}{2kT} \right) \quad (2.5.24)$$

$$\text{Verhältnis(a)} : \frac{J_{id}}{J_r} = \frac{J_0}{J_{ro}} \frac{qV}{2kT} \quad (2.5.25)$$



Mit  $\tau_{RLZ} \approx \tau$  folgt mit  $L = \sqrt{D\tau}$  (siehe (2.3.23), (2.3.24))

$$\text{Verhältnis(b)} \quad : \quad \frac{J_{id}}{J_r} = \frac{2n_i}{w} \left( \frac{L_n}{N_A} + \frac{L_p}{N_D} \right) \frac{qV}{2kT} \quad (2.5.26)$$

Bei

$$\frac{L_n}{N_A} \gg \frac{L_p}{N_D}$$

gilt

$$\text{Näherung(a)} \quad : \quad \frac{J_{id}}{J_r} = \frac{2n_i}{w} \frac{L_n}{N_A} \frac{qV}{2kT} \quad (2.5.27)$$

### 2.5.3.2 Idealität

$$\text{Totale Stromdichte(b)} \quad : \quad J_{to} \left( \frac{qV}{n_{id}kT} - 1 \right) \quad (2.5.28)$$

$$\text{Idealität} \quad : \quad n_{id} = \frac{\frac{dV}{d\log(J_t)}}{2,3026 \cdot \frac{kT}{q}} \quad (2.5.29)$$

## 3 Anhänge

### 3.1 Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$a$	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung
$b$	$\frac{cm^2}{Vs}$	Ladungsträgerbeweglichkeit
$d$	$m$	Dicke
$D_n$	$\frac{m^2}{s}$	Diffusionskonstante für Elektronen
$D_p$	$\frac{m^2}{s}$	Diffusionskonstante für Löcher
$e$	$C$	Elementarladung
$E$	$\frac{N}{C} = \frac{VAs}{mAs} = \frac{V}{m}$	Elektrische Feldstärke
$E_c$	$eV$	Leitungsbandkante
$E_F$	$eV$	Fermi-Energie
$E_g$	$eV$	Energie der Bandlücke
$E_v$	$eV$	Valenzbandkante
$f$	$Hz$	Frequenz
$\vec{F}$	$N = \frac{kgm}{s^2}$	Kraft
$G$	$\frac{A}{V} = \frac{1}{\Omega} = S$	Leitwert
$h$	$eVs$	Plank-Konstante
$\hbar$	$eVs$	Planksches Wirkungsquantum
$i$	$A$	Elektrischer Strom
$j$	$\frac{A}{m^2}$	Elektrische Stromdichte
$J_n$	$\frac{A}{m^2}$	Elektronenstromdichte
$J_p$	$\frac{A}{m^2}$	Löcherstromdichte
$J_{diff}$	$\frac{A}{m^2}$	Diffusionsstromdichte
$J_{part}$	$\frac{A}{m^2}$	Partikelstromdichte
$J_{tO}$	$\frac{A}{m^2}$	Totale Stromdichte
$J_r$	$\frac{A}{m^2}$	Rekombinationsstromdichte

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$J_{drift}$	$\frac{A}{m^2}$	Driftstromdichte
$l$	$m$	Länge
$L$	$m$	Minoritätsladungsträgerdiffusionslänge
$L_n$	$m$	Diffusionslänge Elektronen
$L_p$	$m$	Diffusionslänge Löcher
$n$	...	Elektronenkonzentration
$n_i$	...	Intrinsische Ladungsträgerdichte
$n_{id}$	...	Idealität einer Diode
$N_A$	$m^{-3}$	Akzeptorendichte
$N_D$	$m^{-3}$	Donatorendichte
$N_C$	$cm^{-3}$	Effektive Zustandsdichte der Elektronen
$N_V$	$cm^{-3}$	Effektive Zustandsdichte der Löcher
$p$	...	Lochkonzentration
$q$	$C$	Probeladung (in der Regel = $e$ )
$\vec{r}$	$m$	Weg
$r$	$\Omega$	Differentieller Widerstand
$R$	$\Omega$	Widerstand
$R_F$	$\frac{\Omega}{square}$	Flächenwiderstand
$U$	$V$	Elektrische Spannung
$U_g$	$V$	Gesamtspannung
$v$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$v_D, v_d$	$\frac{m}{s}$	Driftgeschwindigkeit
$w$	$m$	Weite bzw. Breite
$W$	$Ws = J = \frac{kgm^2}{s^2}$	Arbeit bzw. Energie
$\alpha$	$\frac{1}{^\circ C}$	Temperturkoeffizient des Ohmwiderstandes
$\nu$	$Hz$	Hier Frequenz der Welle
$\rho$	$\frac{Vcm}{A} = \Omega cm$	Spezifischer Widerstand

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\rho_e$	...	Ladungsdichte
$\kappa$	$\frac{1}{\Omega cm} = \frac{S}{cm}$	Spezifische Leitfähigkeit
$\varepsilon_0$	$\frac{As}{Vm}$	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
$\varphi$	V	Elektrisches Potential
$\tau$	s	Stoßzeit
$\tau$	s	Minoritätsladungsträgerlebensdauer
$\mu$	$\frac{cm^2}{Vs}$	Beweglichkeit

### 3.2 Wichtige Donatoren und Akzeptoren

Ch. Sym.	Name	Typ
<i>B</i>	Bor	Akzeptor
<i>Al</i>	Alluminium	Akzeptor
<i>Ga</i>	Gallium	Akzeptor
<i>In</i>	Indium	Akzeptor
<i>P</i>	Phosphor	Donator
<i>As</i>	Arsen	Donator
<i>Sb</i>	Antimon	Donator
<i>Bi</i>	Wismut	Donator

### 3.3 Effektive Massen

Band	Wert	Element
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1,08	Silizium
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1,561	Germanium
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1,067	Gallium-Arsenid
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1,10	Silizium
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1,291	Germanium
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1,473	Gallium

### 3.4 Bandlücken wichtiger Materialien

Zeichen	Wert in eV	Material
$E_{g,SiO_2}$	9	Siliziumdioxid
$E_{g,C}$	5,47	Diamant
$E_{g,CdS}$	2,42	Cadmiumsulfid
$E_{g,GaP}$	2,26	Galliumphosphid
$E_{g,GaAs}$	1,42	Gallium-Arsenid
$E_{g,InP}$	1,35	Indiumphosphid
$E_{g,Si}$	1,12	Silizium
$E_{g,Ge}$	0,66	Germanium
$E_{g,InSb}$	0,17	Indiumantimonid

### 3.5 Eckdaten wichtiger Halbleiter

Ch. Sym.	$E_g$ in [eV]	$N_C$ in [ $cm^{-3}$ ]	$N_V$ in [ $cm^{-3}$ ]	$n_i$ in [ $cm^{-3}$ ]
Si	1,124	$2,81 \cdot 10^{19}$	$2,88 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{10}$
Ge	0,67	$1,05 \cdot 10^{19}$	$3,92 \cdot 10^{18}$	$1,55 \cdot 10^{13}$
GaAs	1,424	$4,33 \cdot 10^{17}$	$8,13 \cdot 10^{18}$	$2,04 \cdot 10^6$

### 3.6 Niederfeld- und Niederdotierungsbeweglichkeiten ( $T = 300K$ )

$n/p$	Si	Ge	GaAs
$\mu_n \left[ \frac{cm^2}{Vs} \right]$	1340	3900	8000
$\mu_p \left[ \frac{cm^2}{Vs} \right]$	460	1900	400

### 3.7 Konstanten

Ze.	Wert	Bedeutung
$c$	$2,998... \cdot 10^8 [frac{ms}]$	Lichtgeschwindigkeit
$e, q$	$1,602176... \cdot 10^{-19} [C]$	Elementarladung
$e, q$	$1,602176... \cdot 10^{-19} [J]$	Elementarladung
$h$	$6,63 \cdot 10^{-34} [Js]$	Planck-Konstante
$h$	$4,136... \cdot 10^{-15} [eVs]$	Planck-Konstante
$\hbar$	$\frac{h}{2\pi}$	Plancksches Wirkungsquantum
$k$	$8,6173 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{eV}{K} \right]$	Boltzmann Konstante
$kT$	$25,85 [meV]$	mit der Boltzmann Konstante und $T = 300K$
$m_0$	$9,11 \cdot 10^{-31} [kg]$	Elektronenmasse
$\varepsilon_0$	$8,854... \cdot 10^{-12} \left[ \frac{As}{Vm} \right]$	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\varepsilon_{Si}$	11,90	Korrekturfaktor Dielektrizitätskonstante für Silizium

### 3.8 Nachwort

Diese Formelsammlung wurde nahezu ausschließlich auf Basis des Mikroelektronik-I Scripts von Prof. Dr. Jürgen H. Werner erstellt. Nahezu sämtliche Formeln und Werte sind direkt dem Script entnommen und wurden nicht für diese Sammlung eigenständig hergeleitet. Für ausführlichere Beschreibungen empfehle ich sehr das eben angesprochene Script zu studieren, dass unter (Werner 2017) im Literaturverzeichnis zu finden ist. Diese Formelsammlung ist einzige ein Hilfsmittel für mich und meine Kommilitonen und sehr wahrscheinlich nicht fehlerfrei. Sollten Fehler gefunden werden, würde ich mich sehr freuen wenn man mir das kurz in einer E-Mail (f.leuze@outlook.de) mitteilen würde, damit ich entsprechende Korrekturen vornehmen kann.

## 4 Literatur

Werner, P. D.-N. J. H. (2017), *Mikroelektronik I*. Vorlesungsscript.