Mikroelektronik II Formelsammlung

Florian Leuze

Inhaltsverzeichnis

Versionierung

Datum	Vers.	Kürzel	Änderung
28.08.2018	0.1	FL	Erzeugung Dokument; Erzeugung Inhaltsverzeichnis; Erzeugung Versionierung; Erzeugung Allg., PN Üb., Bohrsch., Bipol., MOSFET
29.08.2018	0.3	FL	Korrektur Ionisationsenergie(d,e); erzeugt Inversionsspannung(a,b)

1 Mikroelektronik II

1.1 Allgemeines

1.1.1 Spezifischer Widerstand

Ohmsches Gesetz : $$V = RI\,[V] \tag{1.1.1}$$

Widerstand : $$R = \frac{V}{I}\,[\Omega] \tag{1.1.2}$$

Leitwert : $$G = \frac{1}{G} = \frac{I}{V}\left[\frac{1}{\Omega} = S\right] \tag{1.1.3}$$

Spezifischer Widerstand : $$R = \rho\frac{L}{A}\,[\Omega] \tag{1.1.4}$$

Leitfähigkeit(a) : $$\sigma\frac{A}{L}\,[S] \tag{1.1.5}$$

Leitfähigkeit(b) : $$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{1.1.6}$$

1.1.2 Elektrostatik

Poisson Gleichung(a) : $$\Delta\varphi(\vec{r}) = \frac{\varrho_Q(\vec{r})}{\varepsilon} \tag{1.1.7}$$

Poisson Gleichung(b) : $$\nabla\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = -\frac{\varrho_Q(\vec{r}}{\varepsilon} \tag{1.1.8}$$

El. Feld : $$\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = -\operatorname{grad}\varphi(\vec{r}) = -\vec{\nabla}(\vec{r}) \tag{1.1.9}$$

Coulomb Kraft : $$\vec{F_c}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{1.1.10}$$

1.2 PN Übergang

1.2.1 Quasi-Fermi-Niveaus (QFN oder Imref)

Elektronenkonzentration : $$n = N_C e^{-\dfrac{E_C - E_{Fn}}{kT}} \tag{1.2.1}$$

Lochkonzentration : $$p = N_V e^{-\dfrac{E_{Fp} - E_V}{kT}} \tag{1.2.2}$$

Massenwirkungsgesetz(b) : $$\begin{aligned} np &= N_C N_V e^{\frac{E_g}{kT}} e^{\frac{E_{Fn}-E_{Fp}}{kT}} \\ &= n_i^2 e^{\dfrac{E_{Fn}-E_{Fp}}{kT}} \end{aligned} \tag{1.2.3}$$

1.2.2 Diffusionsspannung und Weite der RLZ

Flächenladung gesamt	:	$G_{F,total} = Q_L + Q_R = 0$ $= -qN_A d_p + qN_D d_n$	(1.2.4)
Folgerung aus (1.2.4)(a)	:	$N_A d_p = N_D d_n$	(1.2.5)
Folgerung aus (1.2.4)(b)	:	$\frac{d_p}{d_n} = \frac{N_D}{N_A}$	(1.2.6)
Weite(a)	:	$w = d_n + d_p$	(1.2.7)
Diffusionsspannung(a)	:	$V_{bi} = \varphi_R(d_n) = -\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{max}}{2}(d_n + d_p) = -\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{max}}{2} w$	(1.2.8)

Mit (1.2.23) erhält man

Diffusionsspannung(b)	:	$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\varepsilon_d} d_p(d_n + d_p)$	(1.2.9)

Mit (1.2.5) erhält man schließlich

Teilweite d_n	:	$d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_d N_A V_{bi}}{qN_D(N_A + N_D)}} \sim \sqrt{V_{bi}}$	(1.2.10)
Teilweite d_p	:	$d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_d N_D V_{bi}}{qN_A(N_A + N_D)}} \sim \sqrt{V_{bi}}$	(1.2.11)

Bei angelegter ext. Spannung gilt bei (1.2.10) und (1.2.11) $V_{bi,neu} = V_{bi} + V_{DS}$.

Weite(b)	:	$w = dp\left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)$	(1.2.12)
Weite(c)	:	$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_d}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} V_{bi}} \sim \sqrt{V_{bi}}$	(1.2.13)
Weite Schottky	:	$w = x_{n,p} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_d \lvert\Phi_{MS}\rvert}{qN_D}}$	(1.2.14)
Folgerung(a)	:	$w \uparrow \quad \Rightarrow \quad V_{bi} \uparrow$	(1.2.15)
Diffusionsspannung(c)	:	$qV_{bi} = kT\ ln\left(\frac{n_{n0}p_{p0}}{n_i^2}\right) \approx kT\ ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$	(1.2.16)
Diffusionsspannung(d)	:	$V_{bi}^0 = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$	(1.2.17)
Diffusionsspannung(e)	:	$V_{bi} = V_{bi}^0 - V$	(1.2.18)

Diffusionsspannung(f) : $V_{bi} = \frac{q}{2\varepsilon_d}(N_A x_p^2 + N_D x_n^2)$ (1.2.19)

us (1.2.5) und (1.2.7) folgen

Relative Weite p : $d_p = w\frac{N_D}{N_A+N_D}$ (1.2.20)

Relative Weite n : $d_n = w\frac{N_A}{N_A+N_D}$ (1.2.21)

Flächenladungsdichte : $Q_F = |Q_R| = |Q_L| = qN_A d_p = qN_D d_n = q\frac{N_A N_D}{N_A+N_D}w = \sqrt{2\varepsilon_d \frac{N_A N_D}{N_A+N_D} q V_{bi}}$ (1.2.22)

1.2.3 Feldstärke

Maximale el. Feldstärke(a) : $\boldsymbol{\varepsilon}_{max} = \boldsymbol{\varepsilon}(x=0) = \boldsymbol{\varepsilon}_{L,R}(x=0)$ (1.2.23)

Maximale el. Feldstärke(b) : $|\boldsymbol{\varepsilon}_{max}| = 2\frac{V_{bi}}{w} = \frac{qN_{D,A}}{\varepsilon_d}x_{n,p}$ (1.2.24)

1.2.4 Massenwirkungsgesetz

Massenwirkungsgesetz(a) : $np = N_C N_V e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} e^{-\frac{E_F-E_V}{kT}}$ (1.2.25)

Bandlücke : $E_g = E_C - E_V$ (1.2.26)

(1.2.26) in (1.2.25) (wobei n_i die intrinsische Ladungsträgerdichte ist):

Massenwirkungsgesetz(b) : $np = N_C N_V e^{\frac{E_g}{kT}} = n_i^2$ (1.2.27)

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

Massenwirkungsgesetz(c) : $np = n_i^2$ (1.2.28)

Intrinsische Ladungsträgerdichte : $ni = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ (1.2.29)

1.2.4.1 Umformulierungen

$E_C - E_F$: $E_C - E_F = kT \cdot ln\left(\frac{N_C}{n}\right)$ (1.2.30)

$E_F - E_V$: $E_F - E_V = kT \cdot ln\left(\frac{N_V n}{n_i^2}\right)$ (1.2.31)

1.2.5 Energiebetrachtung

Austrittsarbeit a) : $\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S$ (1.2.32)

Austrittsarbeit b) : $V_{bi} = \Phi_{MS}$ (1.2.33)

1.3 Bohrsches Atommodell

1.3.1 Energie

Energie i-te Schale	:	$E_i = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r_i}$	(1.3.1)
Energie Schalenübergang(a)	:	$E_{ae} = E_a - E_e = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_a}\right)$	(1.3.2)
Bahnradius(a), Bohrscher Radius	:	$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{q^2 m}$	(1.3.3)
Bahnradius(b)	:	$r_i = n^2 \cdot r_1$	(1.3.4)
Energie Schalenübergang(b)	:	$E_{ae} = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0}\frac{q^2 m}{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}\left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2}\right)$	(1.3.5)
Frequenz Schalenübergang(a)	:	$f_{ae} = \frac{mg^4}{(4\pi\hbar)^3\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2}\right)$	(1.3.6)
Rydberg-Ritz Formel(a)	:	$\frac{1}{\lambda_{ae}} = \frac{mg^4}{(4\pi\hbar)^3\varepsilon_0^2 C_0}\left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2}\right)$	(1.3.7)
Rydberg Konstante	:	$R_\infty = \frac{mg^4}{(4\pi\hbar)^3\varepsilon_0^2 C_0} = \frac{mq^4}{8h^3\varepsilon_0^2 C_0}$	(1.3.8)
Wellenlänge Schalenübergang(a)	:	$\lambda_{ae} = \left(R_\infty\left(\frac{1}{n_e} - \frac{1}{n_a}\right)\right)^{-1}$	(1.3.9)

Für wasserstoffähnliche Atome wird die Rydberg Ritz Formel angepasst:

Rydberg-Ritz Formel(b)	:	$\frac{1}{\lambda_{ae}} = R_\infty Z^2\left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2}\right)$	(1.3.10)

wobei für Z die Kernladungszahl einzusetzen ist, was bei wasserstoffähnlichen Atomen die Ordnungszahl ist.

Bahngeschwindigkeit	:	$v_i = \frac{\hbar}{mr_i}$	(1.3.11)
Ionisationsenergie(a)	:	$E_{n\infty} = -R_\infty h C_0 \frac{1}{n^2}$	(1.3.12)
Ionisationsenergie(b)	:	$E_{1\infty} = -R_\infty h C_0$	(1.3.13)
Ionisationsenergie(c)	:	$E_{1\infty} = -R_\infty h C_0 Z^2$	(1.3.14)
Schale	:	$n = \sqrt{-\frac{R_\infty h C_0}{E_{n\infty}}}$	(1.3.15)

Kernladungs-zahl : $Z = \sqrt{\frac{1}{\lambda_{ae} R_\infty} \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2} \right)^{-1}}$ (1.3.16)

Betrachtet man ein in ein anderes Element eingebrachtes Elektron müssen die Zusammenhänge angepasst werden.

Bahnradius(c) : $r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{rel}\hbar^3}{q^2 m^*}$ (1.3.17)

Ionisationsenergie(d) : $E_{ae} = R_\infty h C_0 \frac{m^*}{m_0 \cdot \varepsilon_{rel}^2} \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2} \right)$ (1.3.18)

Ionisationsenergie(e) : $E_{1\infty} = -R_\infty h C_0 \frac{m^*}{m_0 \cdot \varepsilon_{rel}^2}$ (1.3.19)

1.4 Bipolartransistor

1.4.1 Leistung

Leistung(a) : $P_{BT} \cong \frac{N}{2} I V_{cc} + N \frac{I}{\beta} V_{cc}$ (1.4.1)

Leistung(b) : $P_{BT} \cong \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\beta} \right) N I V_{cc} = \frac{2+\beta}{2\beta} N I V_{cc}$ (1.4.2)

1.4.2 Emitterwirksamkeit/Transportfaktor

Emitterwirksamkeit(a) : $\alpha_E = \frac{I_n}{I_n + I_p}$ (1.4.3)

Emitterwirksamkeit(b) : $\alpha_e = \frac{1}{1 + \frac{L_n D_p N_A^{(B()}}{L_p D_n N_D^{(E)}}}$ (1.4.4)

Emitterstrom : $|I_E| = A_q D_b \frac{n(0) - 0}{w_B}$ (1.4.5)

Basisstrom : $|I_B| = Aq \frac{n(0) w_b}{2} \frac{1}{\tau_n}$ (1.4.6)

Transportfaktor : $\alpha_T = \frac{|I_C|}{|I_B|} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_n} \right)^2$ (1.4.7)

Diffusionslänge Löcher : $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ (1.4.8)

Diffusionslänge Elektronen : $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ (1.4.9)

1.4.3 Verstärkung

Stromverstärkung	:	$\beta_0 = \frac{I_C}{I_B}$	(1.4.10)
Stromverstärkung Emitterschaltung	:	$\beta_0 = \dfrac{I_C}{I_E - I_C} = \dfrac{\alpha_0}{1-\alpha_0} = \dfrac{\alpha_E \alpha_T}{1-\alpha_E \alpha_T}$	(1.4.11)

1.5 MOSFET

1.5.1 Leistung

Leistung(a)	:	$P_{NMOS} \cong \frac{N}{2} I V_{cc} + N I_{dyn} V_{cc}$	(1.5.1)
Leistung(b)	:	$P_{CMOS,ideal} \cong N C_L f V_{cc}^2$	(1.5.2)

Hierbei gilt I_{dyn} (MOSFET) $< \frac{I}{\beta}$ (BPT).

Dyn. Strom	:	$I_{dyn} = f C_L V_{cc}$	(1.5.3)
Power-Delay-Produkt	:	$\dfrac{P_{CMOS,ideal,max}}{C_l V_{cc}^2} = N f_{max} = konst.$	(1.5.4)

1.5.2 Gate Kapazität

Umladegeschwindigkeit	:	$v_D = \mu \varepsilon = \mu \dfrac{V_{DS}}{L}$	(1.5.5)
Steilheit	:	$g_m = \frac{W C_{gox\mu}}{L}$	(1.5.6)
Umladedauer(a)	:	$\tau_L = \dfrac{L^2}{\mu V_{DS}}$	(1.5.7)
Umladedauer(b)	:	$\tau_L = \dfrac{W C_{gox} L}{g_m}$	(1.5.8)
Inversionsspannung(a)	:	$V_{sl} = \frac{d_I}{\varepsilon} \left(2q \left(\sqrt[3]{N_A} \right)^2 + \sqrt{q N_A \varepsilon \beta ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)} \right) + \beta ln \left(\frac{N_A}{N_i} \right)$	(1.5.9)
Inversionsspannung(b)	:	$V_{Sl} = V_{Isolator} + V_{T,ideal} = V_{Isolator} + 2\Psi_B$	(1.5.10)

1.5.3 Takt

Taktfrequenz	:	$f_T = \dfrac{1}{2\pi \tau_L} = \dfrac{1}{2\pi} \dfrac{g_m}{W C_{gox} L}$	(1.5.11)

2 Anhänge

2.1 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	$\frac{A}{m2}$	Elektrische Stromdichte
J_n	$\frac{A}{m2}$	Elektronenstromdichte
J_p	$\frac{A}{m2}$	Löcherstromdichte
J_{diff}	$\frac{A}{m2}$	Diffusionsstromdichte
J_{part}	$\frac{A}{m2}$	Partikelstromdichte
J_to	$\frac{A}{m2}$	Totale Stromdichte
J_r	$\frac{A}{m2}$	Rekombinationsstromdichte

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	**Einheit**	**Bedeutung**
J_{drift}	$\frac{A}{m2}$	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	Ω	Differentieller Widerstand
R	Ω	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
α	$\frac{1}{°C}$	Temperturkoeffizient des Ohmwiderstandes
ν	Hz	Hier Frequenz der Welle
ρ	$\frac{Vcm}{A} = \Omega cm$	Spezifischer Widerstand

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	**Einheit**	**Bedeutung**
ρ_e	...	Ladungsdichte
κ	$\frac{1}{\Omega cm} = \frac{S}{cm}$	Spezifische Leitfähigkeit
ε_0	$\frac{As}{Vm}$	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
φ	V	Elektrisches Potential
τ	s	Stoßzeit
τ	s	Minoritätsladungsträgerlebensdauer
μ	$\frac{cm^2}{Vs}$	Beweglichkeit

2.2 Wichtige Donatoren und Akzeptoren

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

2.3 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

2.4 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

2.5 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	$1,424$	$4,33 \cdot 10^{17}$	$8,13 \cdot 10^{18}$	$2,04 \cdot 10^{6}$

2.6 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

2.7 Konstanten

Ze.	**Wert**	**Bedeutung**
c	$2,998... \cdot 10^8 \, [fracms]$	Lichtgeschwindigkeit
e, q	$1,602176... \cdot 10^{-19} \, [C]$	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
m^*_{si}	$0,2 \cdot m_0$	Effektive Masse Silizium
m^*_{ge}	$0,1 \cdot m_0$	Effektive Masse Germanium
N_V	$1,04 \cdot 10^{19} cm^{-3}$	Zustandsdichte im VB Silizium
N_C	$2,80 \cdot 10^{19} cm^{-3}$	Zustandsdichte im LB Silizium
R	$1,09737 \cdot 10^7 m^{-1}$	Rydbergkonstante
ε_0	$8,854.. \cdot 10^{-12} \, \left[\frac{As}{Vm}\right]$	Dielektrizitätskonstante des Vakuuums
ε_{Si}	$11,90$	Korrekturfaktor Dielektrizitätskonstante für Silizium
ε_{Ge}	16	Korrekturfaktor Dielektrizitätskonstante für Germanium
ε_{Si0_2}	$3,9$	Korrekturfaktor Dielektrizitätskonstante für Si02

2.8 Nachwort

Diese Formelsammlung wurde nahezu ausschließlich auf Basis des Mikroelektronik-I Scripts von Prof. Dr. Jürgen H. Werner und der Mikroelektronik 2 Vorlesung von Prof. Dr. habil. Jörg Schulze erstellt. Nahezu sämtliche Formeln und Werte sind direkt dem Script und der Vorlesung 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. Es kann direkt im "Kopierlädle"der Universität Stuttgart gedruckt werden. 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.

3 Literatur

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