

Formelsammlung BDM 1

Konstanten:	Formeln:																																																																																																	
<p>k = Boltzmannkonstante = $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K = $0,0862$ meV/K = $1,38066 \cdot 10^{-23}$ J/K [Nm/K VAs/K kg m²/(s² K)]</p> <p>kT = $25,9$ meV [T= 300 K] = $0,86$ meV [T= 10 K] = 86 meV [T=1000 K]</p> <p>e = Elektronenladung = $1,6 \cdot 10^{-19}$ As h = $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js ϵ_0 = $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm 1\AA = 10^{-10} m</p> <p>[N kg m/s²] [VAs Ws J Nm kWh]</p> <p>n-Typ-HL - Donator - (z.B. Phosphor-Dotiertes Si) Elektronenleitung: Majoritäten Elektronen p-Typ-HL - Akzeptor - (z.B Bor-Dotiertes Si) Löcherleitung: Majoritäten Löcher</p>	<p>effektive Zustandsdichten: $N_{c,v}[\text{cm}^{-3}] = 2,5 \cdot 10^{19} (m_{n,p,dos}^*/m_0)^{3/2} (T[K]/300)^{3/2}$</p> <p>Intrinsische Ladungsträgerdichte: $n_i = \sqrt{N_c N_v \exp\{-E_g/kT\}}$ [cm⁻³] Für intrinsischen Halbleiter $n = p = n_i$ $n = N_c \exp\{-((E_c - E_f)/kT)\}$ [cm⁻³] $p = N_v \exp\{-((E_f - E_v)/kT)\}$ [cm⁻³]</p> <p>Massenwirkungsgesetz: $np = n_i^2$, gilt immer, wenn keine Spannung angelegt ist;</p> <p>Leitfähigkeit [1/Ωcm] : - Elektronen: $\sigma_n = q\mu_n n$ - Löcher : $\sigma_p = q\mu_p p$ $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q\mu_n n + q\mu_p p$</p> <p>Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit für intrinsische HL: $\sigma_i = \sigma_0 \exp\{-E_g/(2 k T)\}$ [1/Ωcm], mit $\sigma_0 = q(\mu_n + \mu_p) \sqrt{N_c N_v}$ $\sigma_i = q(\mu_n + \mu_p) n_i$, mit n_i temperaturabhängig; - bei Abhängigkeit von Temperatur ist σ_0 näherungsweise konstant</p> <p>Driftstromdichte [mA/cm²] : - Elektronen: $J_{diff}^n = -q n E$ - Löcher : $J_{diff}^p = q p E$</p> <p>Thermische Geschwindigkeit [cm/s]: $v_{th} = \sqrt{3kT/m^*}$</p> <p>Mittlere freie Flugzeit [s] : - Elektronen: $t_{m,n} = \mu_n m_n^*/q$ - Löcher : $t_{m,p} = \mu_p m_p^*/q$</p> <p>Mittlere freie Weglänge: $l_m = v_{th} t_m$ [cm]</p> <p>Driftgeschwindigkeit [cm/s] : - Elektronen : $v_{d,n} = -q E t_{m,n} / m_n^* = -\mu_n E$ $v_{d,n} = v_{sat} (E/E_{krit}) / \sqrt{(1+(E/E_{krit})^2)}$ - Löcher : $v_{d,p} = q E t_{m,p} / m_p^* = \mu_p E$ $v_{d,p} = v_{sat} (E/E_{krit}) / (1+(E/E_{krit}))$</p> <p>Transitzeit: $t_{tr} = L / v_d$, siehe Skript Seite 76</p> <p>Maximale Schaltfrequenz: $f = 1 / t_{tr}$</p> <p>Diffusionskonstante (Einstein-Gleichung) [cm²/s]: - Elektronen: $D_n = \mu_n kT/q$ - Löcher : $D_p = \mu_p kT/q$</p> <p>Konzentration: M an der Stelle x_1</p> <p>Partikelstromdichte: $J_{part}(x_1) = -D \, dM/dx _{x_1}$ [1/cm²s]</p> <p>Elektrische Diffusionsstromdichte [mA/cm²]: $J_{diff} = q J_{part}$ - Elektronen: $J_{diff,n} = -q J_{part} = q D_n \, dn/dx$ - Löcher : $J_{diff,p} = q J_{part} = -q D_p \, dp/dx$</p> <p>Elektronenstromdichte [mA/cm²]: $J_n = J_{drift}^n - J_{diff}^n = q\mu_n n E + q D_n \, dn/dx$</p> <p>Löcherstromdichte [mA/cm²]: $J_p = J_{drift}^p - J_{diff}^p = q\mu_p p E - q D_p \, dp/dx$</p> <p>Gesamtstromdichte [mA/cm²]: $J_{tot} = J_n + J_p$</p> <p>Diffusionsspannung V_{bi} [V]: $V_{bi}^0 = (E_g/q) + (kT/q) \ln(N_A N_D / (N_A N_D))$ oder $V_{bi}^0 = (kT/q) \ln(N_A N_D / (n_i^2))$ V_s = Spannung am PN-Übergang (V_s in Durchlassrichtung von V_{bi} gezählt): $V_{bi} = V_{bi}^0 - V_s$</p> <p>Weite der Raumladungszone w [cm]: - p-Typ-Seite: $d_p = \sqrt{(2 \epsilon N_D V_{bi}) / (q N_A (N_A + N_D))}$ - n-Typ-Seite: $d_n = \sqrt{(2 \epsilon N_A V_{bi}) / (q N_D (N_A + N_D))}$ $w = d_p + d_n = \sqrt{(2 \epsilon (N_A + N_D) V_{bi}) / (q N_A N_D)}$</p> <p>Relative Weiten: $d_n/d_p = N_A/N_D$</p> <p>Elektrisches Feld [V/cm]: n-Typ-Seite: $E_n(x) = (qN_D(x-d_n)/\epsilon)$ p-Typ-Seite: $E_p(x) = (-qN_A(x+d_p)/\epsilon)$</p> <p>Maximale Feldstärke [V/cm]: $E_{max} = -2V_{bi}/w$</p> <p>Raumladungsdichte [As/cm³]: n-Typ-Seite: $\rho_n = q N_D$ (Donator-dotiert: Majoritäten=Elektronen) p-Typ-Seite: $\rho_p = -q N_A$ (Akzeptor-dotiert: Majoritäten=Löcher)</p> <p>Flächenladungsdichte Q_F [As/cm²]: $Q_F = Q_{F,n} = -\rho_n d_n = \rho_p d_p = Q_{F,p} = qwN_A N_D / (N_A + N_D)$ Über den gesamten PN-Übergang: $Q_{F,tot} = Q_{F,n} + Q_{F,p} = 0$, weil der PN-Übergang als Ganzes ladungsneutral ist</p> <p>Ladung [As]: n-Typ-Seite: $Q_n = \rho_n d_n A$ p-Typ-Seite: $Q_p = \rho_p d_p A$ Gesamt: $Q_{tot} = Q_n + Q_p = 0$, weil der PN-Übergang als Ganzes ladungsneutral ist</p>																																																																																																	
<p>Tabellen:</p> <p>Bandlücken wichtiger Halbleiter (E_g [eV]) bei T=300 K: andere Temperaturen siehe Tabelle weiter unten!</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>SiO₂</td> <td>=9</td> <td>GaAs</td> <td>=1,424</td> </tr> <tr> <td>C (Diamant)</td> <td>=5,47</td> <td>GaP</td> <td>=2,26</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>=1,124</td> <td>InSb</td> <td>=0,17</td> </tr> <tr> <td>Ge</td> <td>=0,66</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Effektive Masse m^*, Zahl der Leitungsbänder M_c Zustandsdichtemasse $m_{n,dos}^*$:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>m_0 = freie Elektronenmasse = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Si</td> <td>Ge</td> <td>GaAs</td> </tr> <tr> <td>$m_{n,dos}^*/m_0$:</td> <td>0,328</td> <td>0,222</td> <td>0,067</td> </tr> <tr> <td>M_c :</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{n,dos}^*/m_0$:</td> <td>1,08</td> <td>0,561</td> <td>0,067</td> </tr> <tr> <td>$m_{p,dos}^*/m_0$:</td> <td>1,1</td> <td>0,291</td> <td>0,473</td> </tr> <tr> <td>$m_{p,dos}^*/m_0 = m_{n,dos}^*/m_0$, da Zahl M_v der Valenzbänder in allen bekannten HL = 1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Effektive Zustandsdichten N_c, N_v und intrinsische Ladungsträgerkonzentration n_i [für 300K]:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>Si</td> <td>Ge</td> <td>GaAs</td> </tr> <tr> <td>N_c [cm⁻³], 300K</td> <td>$2,81 \cdot 10^{19}$</td> <td>$1,05 \cdot 10^{19}$</td> <td>$4,33 \cdot 10^{17}$</td> </tr> <tr> <td>N_v [cm⁻³], 300K</td> <td>$2,88 \cdot 10^{19}$</td> <td>$3,92 \cdot 10^{18}$</td> <td>$8,13 \cdot 10^{18}$</td> </tr> <tr> <td>n_i [cm⁻³], 300K</td> <td>$1,04 \cdot 10^{10}$</td> <td>$1,84 \cdot 10^{13}$</td> <td>$2,04 \cdot 10^6$</td> </tr> </table> <p>Sättigungsgeschwindigkeit v_{sat} und E_{krit} in Si:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>v_{sat} [cm/s]</td> <td>E_{krit} [V/cm]</td> </tr> <tr> <td>Elektronen :</td> <td>$1,1 \cdot 10^7$</td> <td>$8,0 \cdot 10^3$</td> </tr> <tr> <td>Löcher :</td> <td>$9,5 \cdot 10^6$</td> <td>$1,95 \cdot 10^4$</td> </tr> </table> <p>Niederfeld/Niederdotierbeweglichkeit [T=300 K] : !! Nur bei T=300 K und N nahe Null !!</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>Si</td> <td>Ge</td> <td>GaAs</td> </tr> <tr> <td>μ_n [cm²/Vs]</td> <td>1340</td> <td>3900</td> <td>8000</td> </tr> <tr> <td>μ_p [cm²/Vs]</td> <td>460</td> <td>1900</td> <td>400</td> </tr> </table> <p>Graphen im Skript Seite 77</p> <p>Temperaturabhängigkeit der Bandlücke:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>Si</td> <td>Ge</td> <td>GaAs</td> </tr> <tr> <td>$E_g(0)$ [eV]</td> <td>1,170</td> <td>0,7437</td> <td>1,519</td> </tr> <tr> <td>α [10^{-4}eV/K]</td> <td>4,73</td> <td>4,774</td> <td>5,405</td> </tr> <tr> <td>β [K]</td> <td>636</td> <td>235</td> <td>204</td> </tr> </table> <p>Damit dann: $E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta)$</p>	SiO ₂	=9	GaAs	=1,424	C (Diamant)	=5,47	GaP	=2,26	Si	=1,124	InSb	=0,17	Ge	=0,66			m_0 = freie Elektronenmasse = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg					Si	Ge	GaAs	$m_{n,dos}^*/m_0$:	0,328	0,222	0,067	M_c :	6	4	1	$m_{n,dos}^*/m_0$:	1,08	0,561	0,067	$m_{p,dos}^*/m_0$:	1,1	0,291	0,473	$m_{p,dos}^*/m_0 = m_{n,dos}^*/m_0$, da Zahl M_v der Valenzbänder in allen bekannten HL = 1					Si	Ge	GaAs	N_c [cm ⁻³], 300K	$2,81 \cdot 10^{19}$	$1,05 \cdot 10^{19}$	$4,33 \cdot 10^{17}$	N_v [cm ⁻³], 300K	$2,88 \cdot 10^{19}$	$3,92 \cdot 10^{18}$	$8,13 \cdot 10^{18}$	n_i [cm ⁻³], 300K	$1,04 \cdot 10^{10}$	$1,84 \cdot 10^{13}$	$2,04 \cdot 10^6$		v_{sat} [cm/s]	E_{krit} [V/cm]	Elektronen :	$1,1 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^3$	Löcher :	$9,5 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^4$		Si	Ge	GaAs	μ_n [cm ² /Vs]	1340	3900	8000	μ_p [cm ² /Vs]	460	1900	400		Si	Ge	GaAs	$E_g(0)$ [eV]	1,170	0,7437	1,519	α [10^{-4} eV/K]	4,73	4,774	5,405	β [K]	636	235	204	<p>Formeln:</p> <p>Bandlücke [eV]: $E_g = kT \ln(N_c N_v / n_i^2)$</p> <p>effektive Massen : m_n^*, m_p^*</p> <p>Zustandsdichtemasse: $m_{n,dos}^* = M_c^{2/3} m_n^*$</p> <p>Fermi-Dirac-Verteilung: $f(E) = 1 / (\exp\{(E-E_f)/kT\} + 1)$</p> <p>Boltzmann-Näherung für Zustände weit oberhalb des Fermi-Niveaus (z.B. im Leitungsband): $[E - E_f/kT > 3]$ - Elektronen : $f_n(E) = \exp\{-((E-E_f)/kT)\}$ - Löcher : $f_p(E) = 1 - f_n(E)$</p> <p>Boltzmann-Näherung für Zustände weit unterhalb des Fermi-Niveaus (z.B. im Valenzband) : $[E - E_f/kT < -3]$ - Löcher : $f_p(E) = \exp\{-((E_f-E)/kT)\}$ - Elektronen : $f_n(E) = 1 - f_p(E)$</p>
SiO ₂	=9	GaAs	=1,424																																																																																															
C (Diamant)	=5,47	GaP	=2,26																																																																																															
Si	=1,124	InSb	=0,17																																																																																															
Ge	=0,66																																																																																																	
m_0 = freie Elektronenmasse = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg																																																																																																		
	Si	Ge	GaAs																																																																																															
$m_{n,dos}^*/m_0$:	0,328	0,222	0,067																																																																																															
M_c :	6	4	1																																																																																															
$m_{n,dos}^*/m_0$:	1,08	0,561	0,067																																																																																															
$m_{p,dos}^*/m_0$:	1,1	0,291	0,473																																																																																															
$m_{p,dos}^*/m_0 = m_{n,dos}^*/m_0$, da Zahl M_v der Valenzbänder in allen bekannten HL = 1																																																																																																		
	Si	Ge	GaAs																																																																																															
N_c [cm ⁻³], 300K	$2,81 \cdot 10^{19}$	$1,05 \cdot 10^{19}$	$4,33 \cdot 10^{17}$																																																																																															
N_v [cm ⁻³], 300K	$2,88 \cdot 10^{19}$	$3,92 \cdot 10^{18}$	$8,13 \cdot 10^{18}$																																																																																															
n_i [cm ⁻³], 300K	$1,04 \cdot 10^{10}$	$1,84 \cdot 10^{13}$	$2,04 \cdot 10^6$																																																																																															
	v_{sat} [cm/s]	E_{krit} [V/cm]																																																																																																
Elektronen :	$1,1 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^3$																																																																																																
Löcher :	$9,5 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^4$																																																																																																
	Si	Ge	GaAs																																																																																															
μ_n [cm ² /Vs]	1340	3900	8000																																																																																															
μ_p [cm ² /Vs]	460	1900	400																																																																																															
	Si	Ge	GaAs																																																																																															
$E_g(0)$ [eV]	1,170	0,7437	1,519																																																																																															
α [10^{-4} eV/K]	4,73	4,774	5,405																																																																																															
β [K]	636	235	204																																																																																															