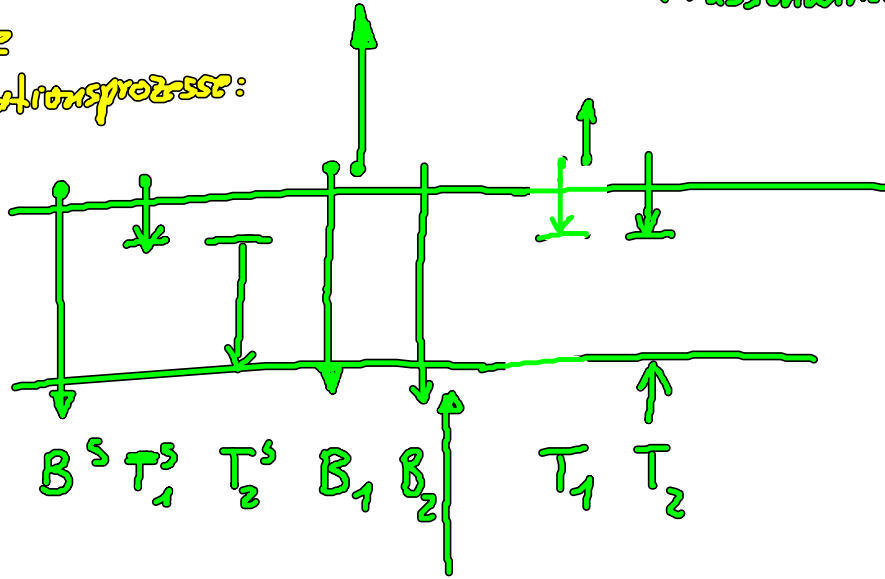


6.4. Generations - Rekombinations - Kinetik (Massenwirkungskinetik)

mögliche
Rekombinationsprozesse:



Rekombinations-
koeffizienten

"Rückprozesse":

$\gamma^s, x_1^s, x_2^s, \gamma_1, \gamma_2, x_1, x_2$

Generationskoeffizienten

Ein - Elektronen - Prozesse (s = single electron)

B^s : Band - Band - Rekombination
(strahlend oder strahlungslos unter Phononenbeteiligung)

T_1^s : Elektroneneinfang durch Störstelle

T_2^s : Locheneinfang

Z - Elektronen - Prozesse

B_1 : eeh - Auger - Rekombination

B_2 : heh - " " "

$\left. \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \end{matrix} \right\}$ Auger - Rekombination an Störstelle

freierenergie Energie wird als kin. Energie an ein 2. Elektron/Loch übertragen

Rückprozesse:

γ^g : Band - Band - Generation (opt./therm./feld induziert)

X_1^s : Elektronenionisation } Störstellenionisation
 X_2^s : Lochemission }

$\left. \begin{matrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{matrix} \right\}$ Band - Band - Stoßionisation

← heißes Elektron/Loch überträgt Energie an Elektron im Valenz/Bandsystem

g-r Raten

Übergangswahrscheinlichkeit pro Zeit- und Volumeneinheit von $|i\rangle$ nach $|f\rangle$ (zeitab. Störungsstärke 1. Ordnung)

$$W_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{fi}|^2 \delta(E_f - E_i)$$

$$M_{fi} := \langle f | H_1 | i \rangle$$

Matrixelement des qu. Störoperators H_1

Zahl der Übergänge pro Zeit- und Volumeneinheit.

(= Rekombinations - bzw. Generationsrate)
 Γ g

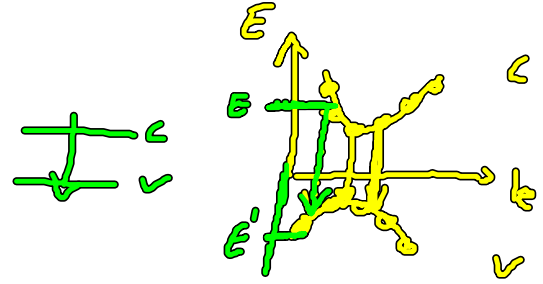
$$p_i W_{ij} (1 - p_j)$$

(p_i : Besetzungswahrsch.)

für 1 - Elektronen Prozesse!

Bem: 5.1.2. Stoßterm in der Boltzmann-Gleichung

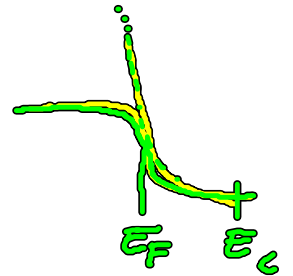
(i) Band - Band - Rekombination (B^3)



$$\Gamma = \sum_{k_1 \in C} \sum_{k_2 \in V} W_{k_1, k_2} p_{k_1} (1 - p_{k_2})$$

$$\approx \int_{E_c}^{\infty} dE \int_{-\infty}^{E_v} dE' W(E, E') f(E, T, E_{F_n}) (1 - f(E', T, E_{F_p})) D_c(E) D_v(E')$$

- hängt ab von n, p über E_{F_n}, E_{F_p}



Nichtentartetes Halbleiter: $n \ll N_c$, $p \ll N_v$

$$f(E, T, E_{F_n}) \approx e^{\frac{E_{F_n} - E}{kT}} \approx \frac{n}{N_c(T)} e^{-\frac{E - E_c}{kT}}$$

$$1 - f(E', T, E_{F_p}) \approx e^{\frac{E' - E_{F_p}}{kT}} \approx \frac{p}{N_v(T)} e^{-\frac{E_v - E'}{kT}}$$

$$\Rightarrow r = n \cdot p \underbrace{\frac{1}{N_c N_v} \int_{E_c}^{\infty} dE \int_{-\infty}^{E_v} dE' W(E, E') e^{-\frac{E-E_c}{kT}} e^{-\frac{E_v-E'}{kT}} D_c(E) D_v(E')}_{B^s(T)}$$

Bemerkung:

aus 4.4.3 (Quantenstatistik)
wissen wir für 2-Dim. System

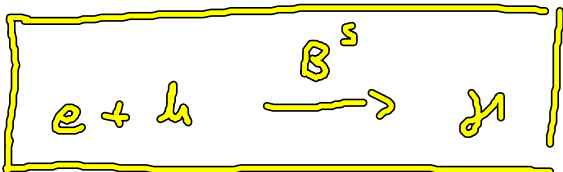
$$W = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\omega_p^3 \mu^2}{\hbar^3 c^3}$$

$\rightarrow W \sim (E-E')^3$
„strahlender Übergang“

$$\Rightarrow B^s(T) n p$$

(Dim. von B^s : $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)

Damit gehorcht für nichtentartete Halbleiter die Band-Band
Rekombination der idealen Reaktionskinetik (vgl. verdünnte
Reaktionssysteme)



El. + Loch \rightarrow Photon

„Bimolekulare Reaktion“

(ii) Band-Störstelle-Rekombination (T_1^s) $\xrightarrow{\gamma} \nu$

$$r = \sum_{i \in C} \sum_{j \in G} w_{ij} p_i (1 - p_j)$$

$$= \int_{E_c}^{\infty} dE c_n(E) f(E, T, E_{Fn}) D_c(E) (1 - f(E_t)) N_t$$

$n \langle c_n \rangle$

↑
Konzentration
der Störstellen

[1 - f(E_t)] N_t Konz. d.
unbesetzter Störstellen

$$= \langle c_n \rangle n p_t$$

mit therm. gemittelte Einfangwahrscheinlichkeit

$$\langle c_n \rangle := \frac{\int_{E_c}^{\infty} c_n(E) f(E, T, E_{Fn}) D_c(E)}{\int_{E_c}^{\infty} dE f(E, T, E_{Fn}) D_c(E)}$$

Für nichtentartetes Leitungsband ist $T_1^s = \langle c_n \rangle$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{ccc} & T_1^s & \\ e + h_t & \longrightarrow & e_t \end{array} \right|$$

EL. + gebundenes Loch \rightarrow gebund. EL.
(unbesetzte Störstelle)

Analog für Loch einfang

$$r = \langle c_p \rangle p n_t = T_2^s p n_t$$

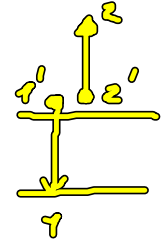
Bem: T^s im allgemeinen
steht nichtlinear von
mittlerer Teilchenenergie \bar{E}
abhängig

\rightarrow interessante nichtlineare

Phänomene im Stromtransport beim HZ.

z.B. Stromfilamente

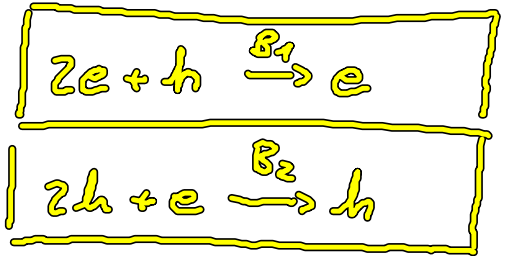
(iii) Band-Band-Auger-Rekombination



$$r = \sum_{k_1, k_2, k_1', k_2'} W(k_1' \rightarrow k_1, k_2' \rightarrow k_2) f_v(k_1') f_c(k_2') (1 - f_v(k_1)) (1 - f_c(k_2))$$

Nichtentartung: $r = B_1 n^2 p$

analog $r = B_2 n p^2$



Störoperator für Auger-Rekombination:

Coulomb-WW zweier Elektronen mit Abschirmung)

$$H_1 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon |r_1 - r_2|} e^{-\lambda |r_1 - r_2|}$$

λ : Debye-Abschirmungslänge
grund: Elektronenwolke

Übersicht über die Massenwirkungskinetik:



$$B' n p - \gamma^s$$



$$T_1' n p_b - \chi_1^s n_b$$



6.5. Detailliertes Gleichgewicht

Im thermodyn. Gleichgewicht (Inlex^o) gilt das Prinzip des detaillierten Gleichgewicht (detailed balance)

$$p_i^o w_{ij}^o (1 - p_i^o) = p_j^o w_{ji}^o (1 - p_j^o) \quad \text{⊗}$$

Hin-Rate

Rück-Rate

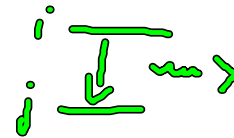
für jeden einzelnen
g-r Prozessen

Beweis: folgt aus der mikroskop. Reversibilität

(i) strahlender Übergang

$$w_{ij} = \tilde{w}_{ij} (N_k + 1)$$

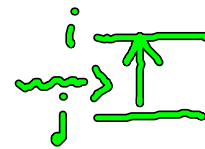
stim + spontane Emission



$$\tilde{w}_{ij} = \tilde{w}_{ji}$$

$$w_{ji} = \tilde{w}_{ji} N_k$$

Absorption



N_k : Zahl der
Photonen

Therm. Gleichgewichtsverteilung der Photonen (Bose-Einstein)

$$\hbar\omega_k = E_i - E_j > 0$$

$$N_k^0 = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega_k}{kT}} - 1}$$

$$N_k^0 + 1 = e^{\frac{\hbar\omega_k}{kT}} \cdot N_k^0$$

Also: $W_{ij}^0 = \tilde{W}_{ij} (N_k^0 + 1) = \tilde{W}_{ij} N_k^0 e^{\frac{\hbar\omega_k}{kT}}$

$$\boxed{W_{ij}^0 = W_{ji}^0 e^{\frac{\hbar\omega_k}{kT}}} \quad (\text{III})$$

Therm. Gleichgewichtsverteilung der Elektronen

$$p_i^0 = \frac{1}{e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} + 1}$$

$$1 - p_i^0 = e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} p_i^0$$

$$\Rightarrow p_i^0 (1 - p_j^0) = e^{\frac{E_j - E_F}{kT}} p_j^0 \cdot p_i^0 \quad (\text{I})$$

$$p_j^0 (1 - p_i^0) = e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} p_i^0 \cdot p_j^0 \quad (\text{II})$$

in \otimes
 $\rightarrow \underline{p_i^0 W_{ij}^0 (1 - p_j^0)}$

$$\underbrace{e^{\frac{E_j - E_i}{kT}} e^{\frac{\hbar\omega_j}{kT}}}_1$$

$$(I) \downarrow = e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} p_i^0 \cdot p_i^0 W_{ij}^0$$

$$(II) \downarrow = e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} p_i^0 (1 - p_i^0) e^{-\frac{(E_i - E_F)}{kT}} W_{ij}^0$$

$$(III) \downarrow = e^{\frac{E_j - E_i}{kT}} p_i^0 (1 - p_i^0) W_{ji}^0 e^{\frac{\hbar\omega_j}{kT}}$$

$$= p_i^0 (1 - p_i^0) W_{ji}^0$$

VII

(ii) Auger-Prozesse