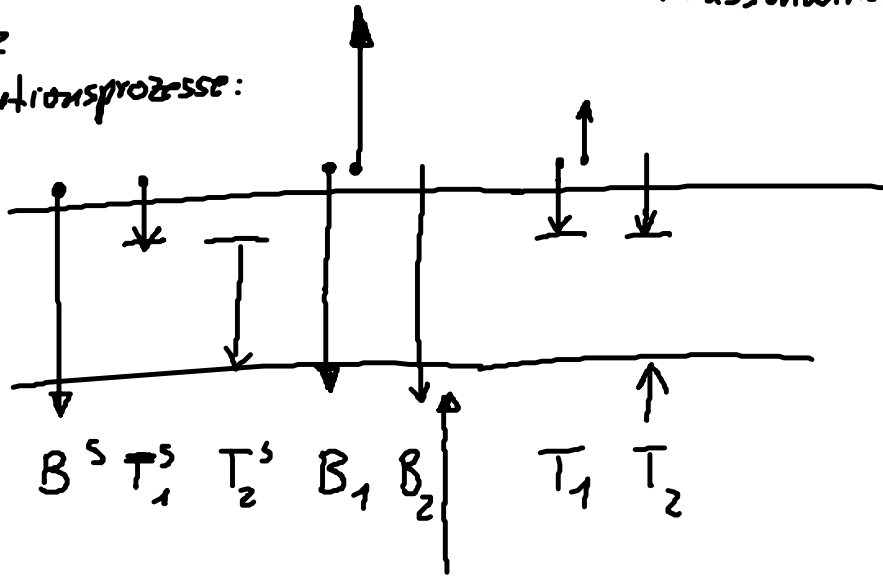


6.4. Generations - Rekombinations - Kinetik (Massenwirkungskinetik)

mögliche
Rekombinationsprozesse:



Rekombinations -
koeffizienten

"
Rückprozesse:

γ^s x_1^s x_2^s γ_1 γ_2 x_1 x_2

Generationskoeffizienten

Ein - Elektronen - Prozesse ($s \hat{=}$ 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

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

Rückprozesse:

γ^s : 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/Leitungsband

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)

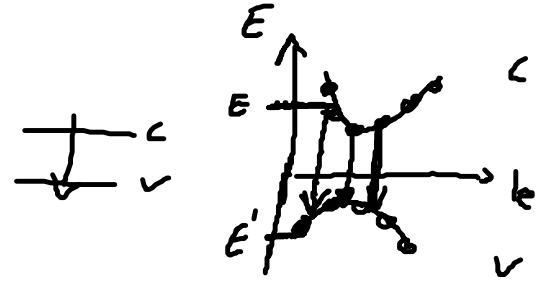
$$p_i W_{if} (1 - p_f)$$

(p_i : Besetzungswahrsch.)

für 1 - Elektronen Prozesse!

Bem: 5.1.2. Stoßterm in der Boltzmann-Gleichung

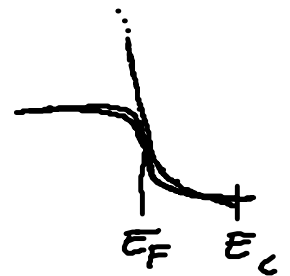
(i) Band - Band - Rekombination (B^B)



$$\Gamma = \sum_{k_i \in c} \sum_{k_j \in v} W_{k_i k_j} p_{k_i} (1 - p_{k_j})$$

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

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



Nichtentarteter 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-Niveau System

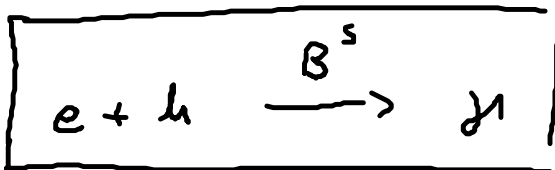
$$W = \frac{1}{3\pi\epsilon_0} \frac{\omega_A^3 \mu^2}{\hbar c^3}$$

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

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

(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) $\frac{\gamma}{\nu}$

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

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

$n \langle c_n \rangle$

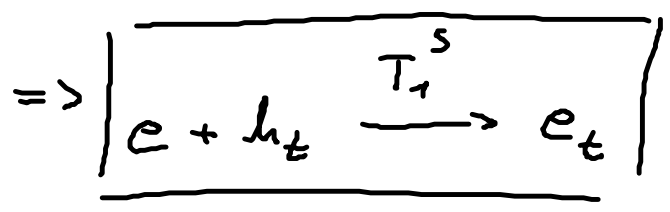
↑
Konzentration
der Störstellen
[1 - f(E_t)] N_t Konz. d.
unbesetzten Störstellen

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

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 $T_1^s = \langle c_n \rangle$



EL. + gebundenes Loch → gesond. EL.
(unbesetzte Störstelle)

Analog für Loch einfang

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

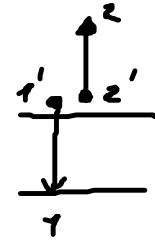
Bem: T^s im allgemeinen
stark nichtlinear von
mittleren Teilchenenergie \bar{E}
abhängig

→ interessante nichtlineare

Phänomene im Stromtransport
beim HZ.

z.B. Stromfilamente

(iii) Band-Band-Auger-Rekombination



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

Nichtentartung: $r = B_1 n^2 p$

analog $r = B_2 n p^2$

$2e + h \xrightarrow{B_1} e$
$2h + e \xrightarrow{B_2} h$

Storoperator für Auger-Rekombination:

Coulomb-WW zweier Elektronen mit
(Abschirmung)

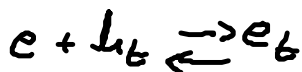
$$H_1 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon|r_1 - r_2|} e^{-\lambda|r_1 - r_2|}$$

λ : Debye-Abschirmungslänge
grund: Elektronenwolke

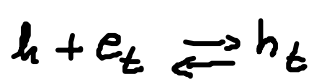
Übersicht über die Massenwirkungskinetik:



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



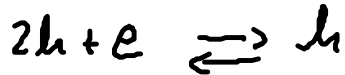
$$T_1^s n p_t - X_1^s n_t$$



$$T_2^s p n_t - X_2^s p_t$$



$$B_1 n^2 p - \gamma_1 n$$



$$B_2 p^2 n - \gamma_2 p$$

6.5. Detailliertes Gleichgewicht

Im thermodyn. Gleichgewicht (Index 0) gilt das Prinzip des detaillierten Gleichgewicht (detailed balance)

$$\boxed{p_i^0 w_{ij}^0 (1 - p_i^0) = p_j^0 w_{ji}^0 (1 - p_j^0)} \quad \otimes$$

Hin-Rate

Rück-Rate

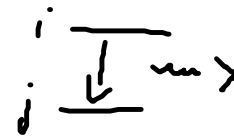
für jeden einzelnen
s-r Prozess

Beweis: folgt aus der mikroskop. Reversibilität

(i) strahlender Übergang

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

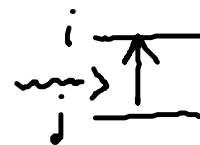
stim + spontane Emission



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

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

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

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

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

$$\underbrace{e^{\frac{E_j - E_i}{kT}} e^{\frac{\hbar \omega_0}{kT}}}_1$$

(I)

$$\downarrow = e^{\frac{E_j - E_F}{kT}} p_j^0 \cdot p_i^0 W_{ij}^0$$

(II)

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

(III)

$$\downarrow = e^{\frac{E_j - E_i}{kT}} p_j^0 (1 - p_i^0) W_{ji}^0 e^{\frac{\hbar \omega_0}{kT}}$$

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

~~IV~~

(ii) Auger-Prozesse