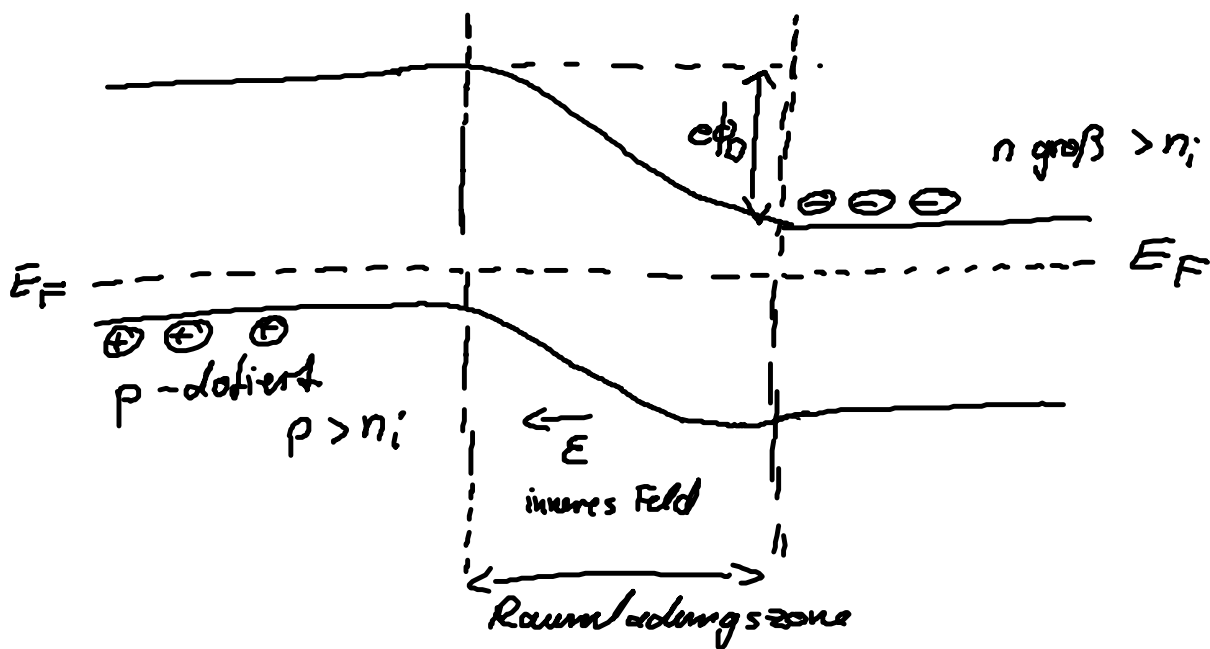


9. Rekombination und Nichtgleichgewichtsstatistik

• Globales thermodyn. Gleichgewicht:

- einheitliche, ortsunabh. Temperatur T
- einheitliches, ortsunabh. Fermiiveau E_F für alle Elektronen

Bsp.: p-n Übergang im thermodyn. GG.



• Lokales thermodyn. Gleichgewicht:

$$T(r) \Rightarrow \text{Wärmestrom} \sim \nabla T(r)$$

$$E_F(r) \Rightarrow \text{Diffusions- und Driftströme der Ladungsträger} \\ \sim \nabla E_F(r)$$

• Thermisches Nichtgleichgewicht :

- keine einheitliche Temperatur der Elektronen, Löcher und des Kristallgitters: $T_e \neq T_h \neq T_L$

(kurze Zeiten $< 1\text{ps}$, hohe Anregung: optische Überschussenergie
starke elektr. Felder)

→ Energieaustausch zwischen Elektronen, Löchern und Gitter zu langsam

→ heiße Ladungsträger $T_e, T_h > T_L$

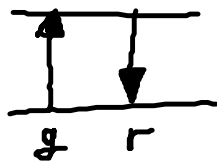
(aber noch Energieaustausch jeder Ladungsträgerart untereinander)

• Chemisches Nichtgleichgewicht

— kein einheitliches Fermi-niveau (elektrochem. Pot.)

für alle Elektronen:

mittlere Teilchenzahl in den einzelnen Energie-niveaus ist durch generations - Rekombinations ($g-r$) Prozesse der Ladungsträger bestimmt



übergänge optisch, thermisch oder durch el. Felder

9.1. Quasi - Fermi - Niveaus

- Zeitkalentrennung zwischen schneller e-e
h-h streuung ($< 10^{-13}$)

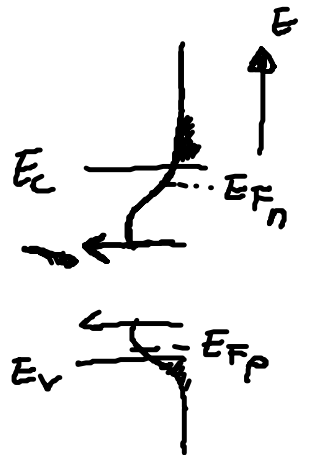
und langsamer e-h-Rekombination ($> 10^{-9}$ s)

→ GG Verteilung innerhalb der Bänder

ABER: kein GG zwischen Leitungs + Valenzband

⇒ Beschreibung durch separate Quasi-Fermi-Niveaus

$$\text{Elektronen: } f(E, T, E_{F_n}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{F_n}}{kT}\right)}$$



$$\text{Löcher: } 1 - f(E, T, E_{F_p}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{F_p} - E}{kT}\right)}$$

Ladungsträgerdichten ($d=3$, Nichtentartung):

$$n = N_c(T) \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_c}{kT}\right)$$

$$p = N_v(T) \exp\left(\frac{E_v - E_{F_p}}{kT}\right)$$

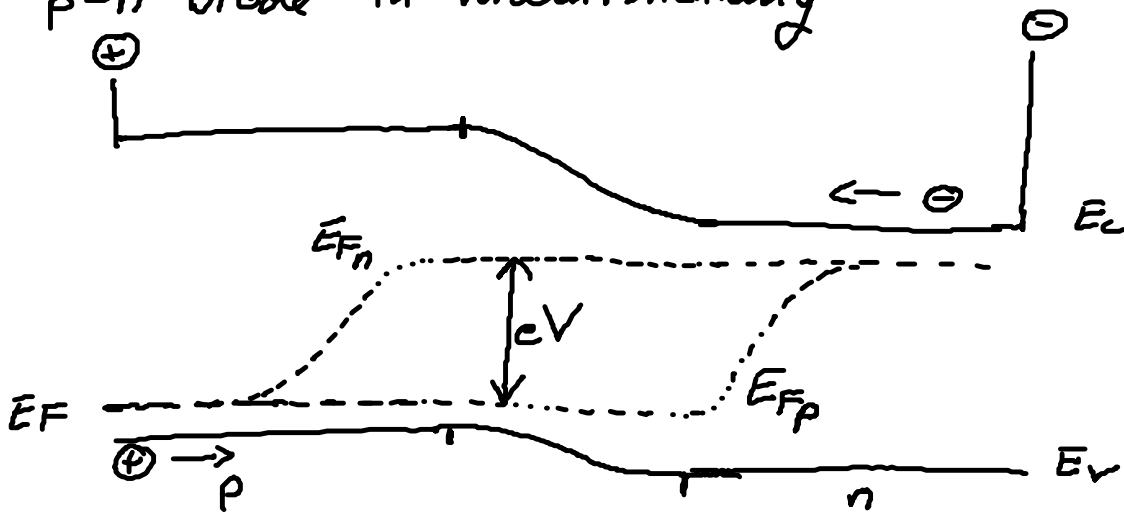
$$\Rightarrow n \cdot p = \underbrace{N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right)}_{n_i^2} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_p}}{kT}\right)}_{\text{Maß für die Abweichung vom GG}}$$

n_i^2
intrinsische GG-Konz.

Maß für die
Abweichung vom GG

Bsp.

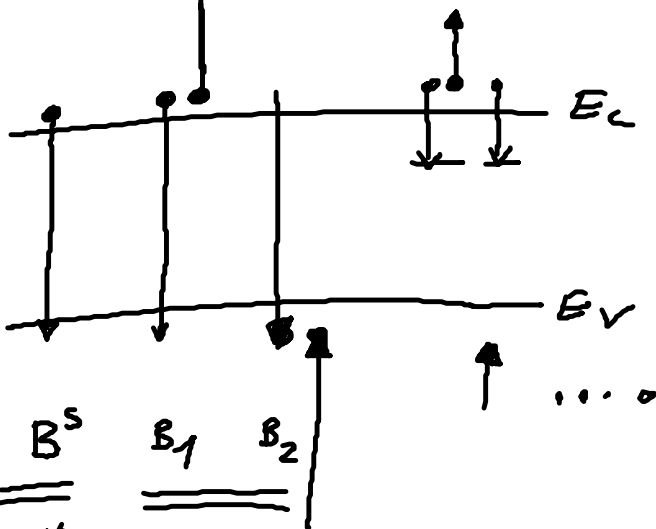
p-n Diode in Vorwärtsrichtung



Angelegte Spannung: V

- Überschussladungsträger vom n-dot. Gebiet ins p-Gebiet injiziert
- erhöhte Minoritäts-Ladungsträgerdichte
- Aufspaltung des Fermienerveaus in 2 Quasi-Fermi-Niveaus
- Nettostrom bei Polung in Vorwärtsrichtung

9.2. Generations - Rekombinations - Kinetik



Rückp.: γ^s γ_1 γ_2

Ein-Elektron-Prozesse ($s \hat{=} \text{single electron}$)

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

2-Elektron-Prozesse

B_1 : eeh - Auger Rekombination
 B_2 : heb - " " } freierwende Rekombinationsenergie wird als kin. Energie an ein 2. Elektron/Loch übertragen

Rückprozesse

γ^s : Band-Band-Generation } heißes Elektron/Loch überträgt Energie an Elektron im Valenzband
 $\gamma_{1/2}$: Stoßionisation

g-r Raten

Übergangswahrscheinlichkeit pro Zeit- und Volumeneinheit von $|i\rangle$ nach $|f\rangle$

$$W_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{fi}|^2 \delta(E_f - E_i) \quad \left(M_{fi} := \langle f | H_1 | i \rangle \right)$$

Matrixelement des gestörten Störoperators H_1

Zahl der Übergänge pro Zeit und Volumeneinheit:

$$\boxed{P_i W_{if} (1 - P_f)}$$

(P_i : Besetzungswahrscheinlichkeit)
für 1-Elektron-Prozesse!

(B^S) Band-Band - Rekombination

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

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

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

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

$$f(E, T, E_{F_n}) \approx \exp\left(\frac{E_{F_n} - E}{kT}\right) \approx \frac{n}{N_c(T)} \exp\left(-\frac{E - E_c}{kT}\right)$$

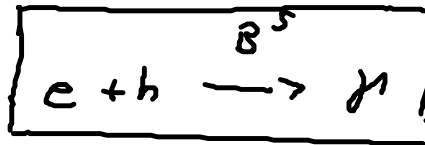
$$1 - f(E', T, E_{F_p}) \approx \exp\left(\frac{E' - E_{F_p}}{kT}\right) \approx \frac{p}{N_v(T)} \exp\left(-\frac{E_v - E'}{kT}\right)$$

$$\Rightarrow r = \frac{n}{N_c} \cdot \frac{p}{N_v} \int_{E_c}^{\infty} dE \int_{-\infty}^{E_v} dE' W(E, E') e^{-\frac{E - E_c}{kT}} e^{-\frac{E_v - E'}{kT}} D_c(E) D_v(E')$$

$$= n p B^3(T)$$

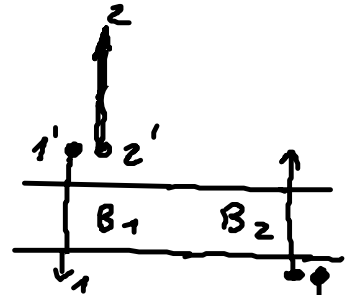
$$\text{Dim. von } B^1: \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$$

\Rightarrow Damit gekürzt für nichtentartete HL die Band-Band-Rekomb. dem Massenwirkungsgesetz der idealen Reaktionskinetik



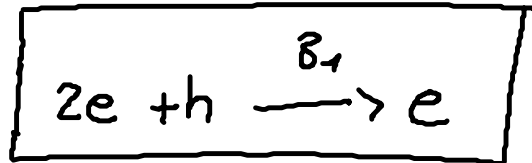
„Bimolekulare Reaktion“

B^1, B^2 Band - Band - Auger - Rekombination

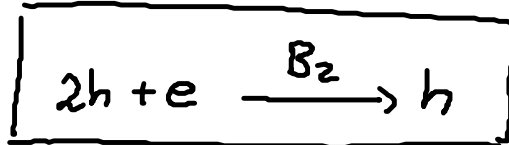


$$\Gamma = \sum_{\underline{k}_1', \underline{k}_2', \underline{k}_1, \underline{k}_2} W(\underline{k}_1' \rightarrow \underline{k}_1, \underline{k}_2' \rightarrow \underline{k}_2) f_c(\underline{k}_1') f_c(\underline{k}_2') (1 - f_v(\underline{k}_1)) (1 - f_c(\underline{k}_2))$$

Nichtentartung: $r = B_1 n^2 p$



analog: $r = B_2 n p^2$



- Störoperator für Auger-Rekombination
Coulomb-WW zweier Elektronen:

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