

Fermi - Flächen

Kap 10

Halbleiter

im Grundzustand ($T=0$): (bei Raumtemp.)

- Isolator: alle Bänder entweder voll oder leer ($\sim 10^{12} \Omega m$)

- Metall: wenigstens ein Band teilweise gefüllt ($\sim 10^{-7} \Omega m$)

Was ist jetzt ein Halbleiter? $\sim 10^{-4}$ bis $10^7 \Omega m$

Bsp. Si, Ge (4te Hauptgruppe)

P, B, Se, Te

Verbindungen III-V GaAs, InP

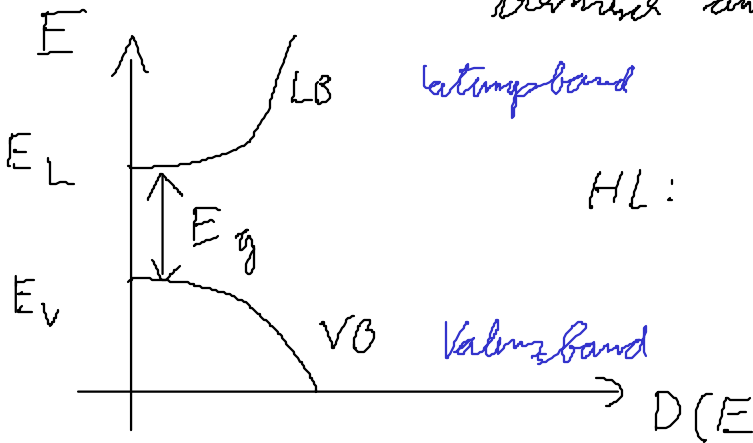
II-VI ZnS, CdS

IV-IV SiC

Grund: Bandlücke ist kleiner als bei Isolator

HL: bei $T=0$ Isolator

$T>0$ Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen thermisch angeregt werden



HL: $0,7 eV < E_g < 2 eV$

Zahl n der thermisch angeregten Elektronen nimmt mit T stark zu $n \sim e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$

Besonderheit: - Photoleitfähigkeit

- negativer Temp-Koeffizient ($T \uparrow \Rightarrow \rho \downarrow$)

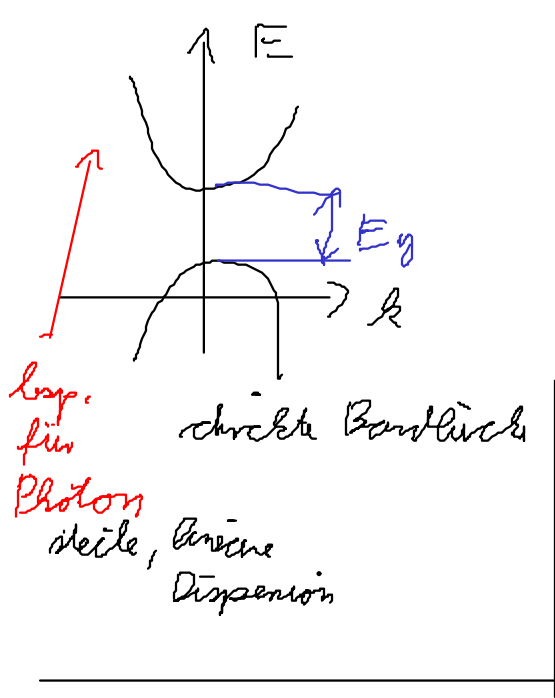
- Eigenschaften hängen stark von Verunreinigungen ab

- Gleichrichtereigenschaft zwischen zwei versch. HL

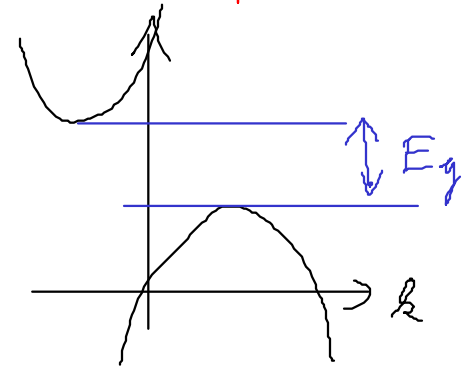
- intrinsische HL Leitfähigkeit durch thermische Anregung
- extrinsische HL " " Dotierung bestimmt
- = dotierte

10.7 intrinsische Halbleiter

10.7.1 Bandlücke und optische Absorption



Exp. für Photon steile, lineare Dispersion



indirekte Bandlücke

ind. Übergänge: Impuls wird übertragen?
 ⇒ Kristallimpulserhaltung
 Photon hat nur kleinen Impuls für

relativ große Energie

⇒ Phonon nimmt Impuls auf
 ↳ hat großen Impuls bei kleiner Energie

10.7.2 effektive Masse von El. und Lochern

eff. Masse $m^* = \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$ Bandkrümmung

$$E_n = E_L + \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_n^*}$$

Bandindex

in der Nähe der Bandlücke: parabolische Näherung

Bestimmung: Zyklotronresonanz $\omega_c = \frac{eB}{m}$

Si, Ge Diamantstruktur (Atome auf $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $\frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ auf fcc)

Sind indirekte HL

Elektronen im Leitungsband: Flächen konstanter Energie sind Rotationsellipsoide mit langen Achsen $\parallel [100]$ bei Si / $\parallel [111]$ bei Ge
 \Rightarrow longitudinale und transversale effektive Massen

Si: $\frac{m_x^*}{m_e} = 0,79$ $\frac{m_e^*}{m_e} = 0,98$
↳ Elektronenmasse

Ge 0,082 7,57

Löcher im Valenzband

Zwei entartete VB-Maxima, konst. Energieflächen fast kugelförmig, unterschiedliche Bandkrümmung
 \Rightarrow leichte und schwere Löcher

Si: 0,16 m_e 0,49 m_e

GaAs "Diamantstruktur"

dichtste HL: Elektronen 0,07 m_e
 Löcher 0,12 m_e - 0,68 m_e

10.7.3 Ladungsträgerdichte

Leitfähigkeit $\sigma = \rho^{-1} = e (n \mu_n + p \mu_p)$
Fall der Elektronen / Löcher Beweglichkeit

$$n = \int_{E_L}^{\infty} D_L(E) f(E, T) dE$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} D_V(E) [1 - f(E, T)] dE$$

Löcher = keine Elektronen

mit $D_L(E) = \frac{(2 m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_L}$ für $E > E_L$

$D_V(E) = \frac{(2 m_p)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E_V - E}$ für $E < E_V$ Banden-Parabeln

jetzt: nicht entartete HL (= klassische Näherung)

⇒ Fermi-Vert. durch Boltzmann-Vert. ersetzen

(Diese Näherung ist nicht immer erfüllt - dann heißt der

HL "entartet")

chem. Pot.

hier also $f(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right) + 1} \approx \exp\left(-\frac{E - \mu}{k_B T}\right)$

$1 - f(E, T) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{E - \mu}{k_B T}\right) + 1} \approx \exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right)$

jetzt nur für Elektronen / Löcher analog

$n = 2 \left(\frac{m_n^* k_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_L - \mu}{k_B T}\right) = N_L \exp\left(-\frac{E_L - \mu}{k_B T}\right)$

$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - \mu}{k_B T}\right)$

eff. Dichte

vgl. thermische Aktivierung

N_L, N_V sind effektive Zustandsdichte,

nur schwach temperaturabhängig

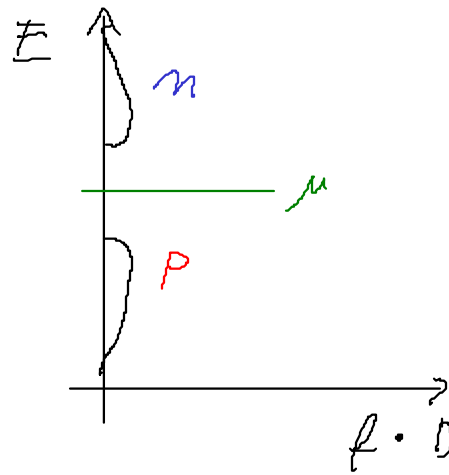
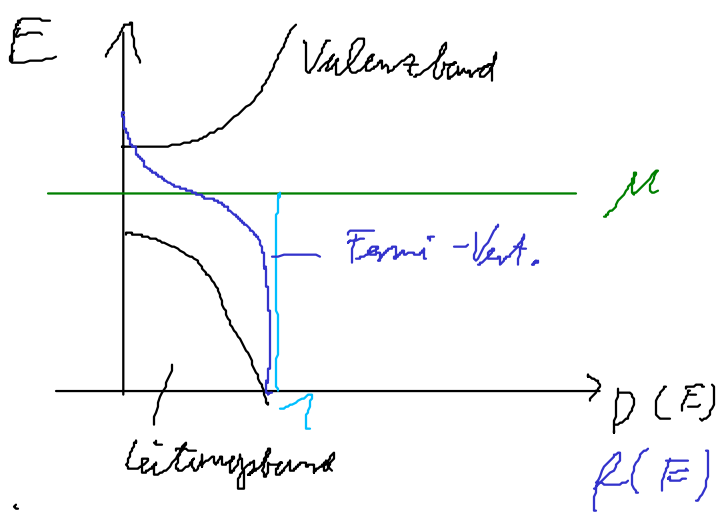
sieht aus wie 1 Molare

$n \cdot p = N_L N_V \exp\left(\frac{E_V - E_L}{k_B T}\right) = N_L N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$

"Massenwirkungsgesetz"

⇒ man muss nur

noch n oder p betrachten

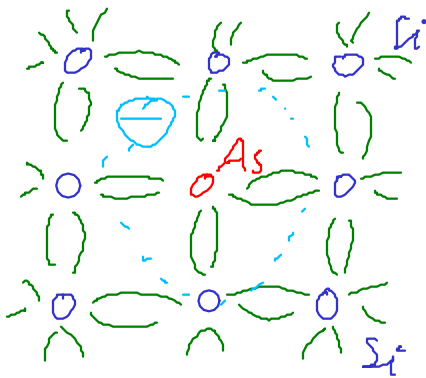


intrinsische HL: $n_i = p_i$
 $\Rightarrow n_i = p_i = \sqrt{N_L N_V} e^{-\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right)}$

lage und temperaturabhängigkeit des chem. Potentials aus ladungsträgerneutralität

$$\mu = \frac{E_L + E_V}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)$$

10.2. dotierte Halbleiter



Donatoren: liefern zusätzliches Elektron

(P, As) höhere Valenz als das Wirtsmaterial

Akzeptoren: liefern zusätzliche Locher

(B, Al, Ga) niedrigere Valenz als das Wirtsmaterial

Donator verhält sich wie pos. Ion mit Elektron

\Rightarrow "Atom" mit Bohr-Radius $a_0 \approx 25 \text{ \AA}$

(= 50 mal größer als bei H-Atom)

\Leftrightarrow Bindungsenergie $\sim 20 \text{ meV}$

//////

Donator-Niveaus

//////

Akzeptor-Niveaus

//////

//////

für nächstes mal

Elektronendichte in Abh. von Temp $n(T)$

n-HL

