10. Halbleiter (wie Skript bei S. 111)

LB: Leitungsband
VB: Valenzband

10.2 Konzentration der Ladungsträger

Effektive Zustandsdichte $N(T) = \frac{1}{4}\left(\frac{2m_L^* kT}{\pi \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}$ (Elektron)

entsprechend $P(T)$ mit m_V^* statt m_L^* (Loch)

Produkt der Ladungsträgerdichten

$$\boxed{n \cdot p = N \cdot P \cdot \exp\left[-\frac{(E_L - E_V)}{kT}\right] = N \cdot P \cdot \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right]}$$

- chem. Potential μ kommt hier nicht mehr vor
- gilt auch für dotierte Halbleiter
- „Massenwirkungsgesetz"
  - Erhöht man n oder p, sinkt p oder n:

    $n \cdot p = \text{const}$ bei $T = \text{const}$.

Intrinsischer Halbleiter: das heißt kein Beitrag zu n oder p durch Verunreinigung

$n(T) = p(T) = n_i(T) = (n \cdot p)^{\frac{1}{2}}$

$$\boxed{n_i(T) = \frac{1}{4}\left(\frac{2kT}{\pi \hbar^2}\right)(m_L^* m_V^*)^{\frac{3}{4}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right]}$$

intrinsische Ladungsträgerdichte $n_i(T)$

Beispiele (bei 300 K)

Metall	$n_i\ [\frac{1}{cm^3}]$
Si	$1{,}5 \cdot 10^{10}$
Ge	$2{,}4 \cdot 10^{13}$
GaAs	$5 \cdot 10^{7}$

Aus $\frac{n}{p} = 1 \Rightarrow$

$$\boxed{\mu_i = E_V + \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_V^*}{m_L^*}\right)}$$

- Bedingung Nichtentartung erfüllt für $kT \ll E_g$

10.3 Dotierte Halbleiter

Einbau von elektrisch aktiven Störstellen: „Dotierung"

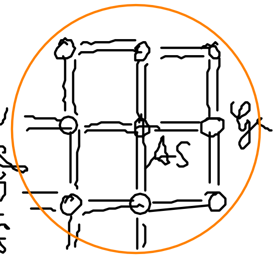
Donatoren: liefert zusätzl. Elektr. ins LB, höhere Valenz als Wirtsmetall

Akzeptoren: liefert zusätzl. Löcher ins VB, niedere (fangen Elektr. ein)

Beispiel • HL aus IV. Gruppe substituieren einige Atome der V. Gruppe (Donatoren) oder der III. Gruppe (Akzeptoren)

IV	V	III
Si	P	B
Ge	As	Ga

Modell



Dotierung	Bindungs E	Ionisierungs E
As in Ge	0,013 eV	9,81 eV

Donator: pos. geladenes Ion mit zusätzl. Elektr. statistisch verteilt

Bohrradius des zusätzlichen Elektrons

Bindungsenergie des zusätzl. e^- an das Ion ist wesentlich kleiner als die Ionisierungsenergie des freien Ions

Gründe:

(1) statische DK ε reduziert Coulomb-WW: Ge: $\varepsilon = 15,8$, Si: $\varepsilon = 11,7$

(2) Elektron nahe LB-Unterkante, Löcher nahe VB-Oberkante: $m^*_{LN} < m$

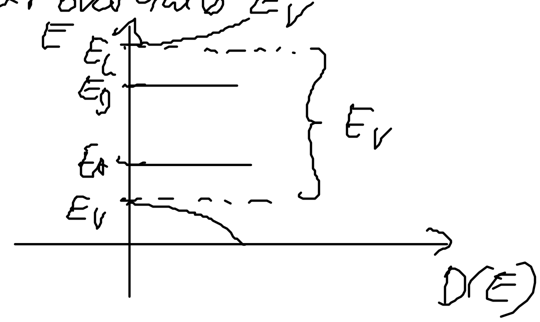
⇒ Wasserstoffproblem mit $\frac{e^2}{r} \to \frac{e^2}{\varepsilon r}$, $m \to m^*$

- Radius der 1. Bohrschen Bahn: $a_0^\# = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2} \to a_0 = \frac{m}{m^*}\varepsilon a_0^\# \gg a_0^\#$
- Bindungsenergie im Grundzustand $E_0^\# = \frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2} = 13,6\,eV \to E_0 = \frac{m^*}{m}\frac{1}{\varepsilon^2}E_0^\#$

	a_0 [Å]	E_0 [eV]	$(E_L - E_D)$ P	As	Sb [meV]
Si	19	0,023	45	49	39
Ge	38	0,012	12	12,7	9,6

- Bindungsenergie $(E_L - E_D) \ll E_g$ (relativ zu LB-Unterkante gemessen) d.h. zusätzliche Energieniveaus E_D dicht unterhalb E_L
- analog Akzeptoratome: z.B. Ga in Ge
  ⇒ zusätzliche Elektron. Niveaus E_A dicht oberhalb E_V

	$(E_A - E_V)$ B	Al	Ga [meV]
Si	45	57	65
Ge	10,4	10,2	10,8



- D(E) für Störstellenzustände δ-Fkt mit $\int \delta$-Fkt = Anzahl der Zustände der Donatoren N_D bzw Akzeptoren N_A

wichtige Konsequenz:

- thermische Anregung von El aus E_D ins LB wesentlich „leichter" als El aus VB ins LB
  El aus VB ins E_A, d.h. Loch in VB

10.4 Ladungsträgerdichte in dotierten Halbleitern

$n_D = \langle n \rangle \cdot N_D$ mittlere Besetzungszahl $\langle n \rangle$, $\langle p \rangle$ einer Störstelle

$p_A = \langle p \rangle \cdot N_A$

Donatorniveaus: Besetzungsmöglichkeiten

- unbesetzt
- 1 Elektron ↑ oder ↓
- Doppelbesetzung unterdrückt, wegen Coulombabst. an Störstelle

$$\Rightarrow \boxed{n_D = \frac{N_D}{\frac{1}{2}\exp\left[\frac{(E_D-\mu)}{kT}\right]+1}} \quad e^-$$

(Faktor $\frac{1}{2}$ wegen Unterdrückung der Doppelbes.)

$$\boxed{n_A = \frac{N_A}{\frac{1}{2}\exp\left[\frac{(\mu-E_A)}{kT}\right]+1}} \quad \text{Löcher}$$

Neutralitätsbedingung

$$\underbrace{p}_{\text{Löcher im VB}} + \underbrace{(N_D - n_D)}_{\text{geladene Donatoren}} = \underbrace{n}_{\text{Elektr. im LB}} + \underbrace{(N_A - p_A)}_{\text{geladene Störstellen}}$$

- hieraus und aus $n, p, n_D, p_A \Rightarrow \mu(T)$

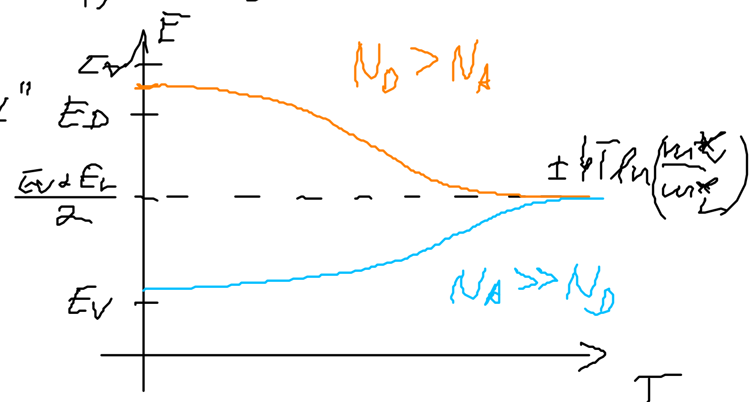
qualitativ für n-HL

- $T=0$: $n_D = N_D \Rightarrow E_D - \mu < 0$, $\mu > E_D$

  LB ist leer $\Rightarrow \mu < E_L$

- $T \gg \frac{E_L - E_D}{2}$: Donatoren „erschöpft"

  Elekt. im LB stammen hauptsächlich aus VB



- $\Delta n = n - p \neq 0$ aber $n \cdot p = n_i^2$

  $n = \Delta n + p = \Delta n + \frac{n_i^2}{n}$ entsprechend für p

  $$\left.\begin{matrix} n \\ p \end{matrix}\right\} = \frac{1}{2}\left((\Delta n)^2 + 4n_i\right)^{\frac{1}{2}} \pm \Delta n$$

  $$\frac{n}{n_i} = \exp\left[\frac{(\mu-\mu_i)}{kT}\right], \quad \frac{p}{p_i} = \exp\left[-\frac{(\mu-\mu_i)}{kT}\right]$$

  $$\boxed{\frac{\Delta n}{n_i} = 2\sinh\left(\frac{\mu-\mu_i}{kT}\right)}$$

- $E_D - \mu \gg kT$, $\mu - E_A \gg kT$: μ zwischen E_D und E_A

Donatoren und Akzeptoren fast vollständig ionisiert

$n_D \ll N_D,\ p_A \ll N_A$

(a) intrinsischer Bereich $n_i \gg |N_D - N_A|$

$\left.\begin{matrix} n \\ p \end{matrix}\right\} \approx n_i \pm \frac{1}{2}(N_D - N_A)$

(b) extrinsischer Bereich $n_i \ll |N_D - N_A|$

$N_D > N_A$: $n \approx N_D - N_A$ $\quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$ $\quad$ (n-HL)

$N_A < N_D$: $p \approx N_A - N_D$ $\quad n \approx N_A - N_D$ $\quad$ (p-HL)

Majoritätsträger $\quad$ Minoritätsträger

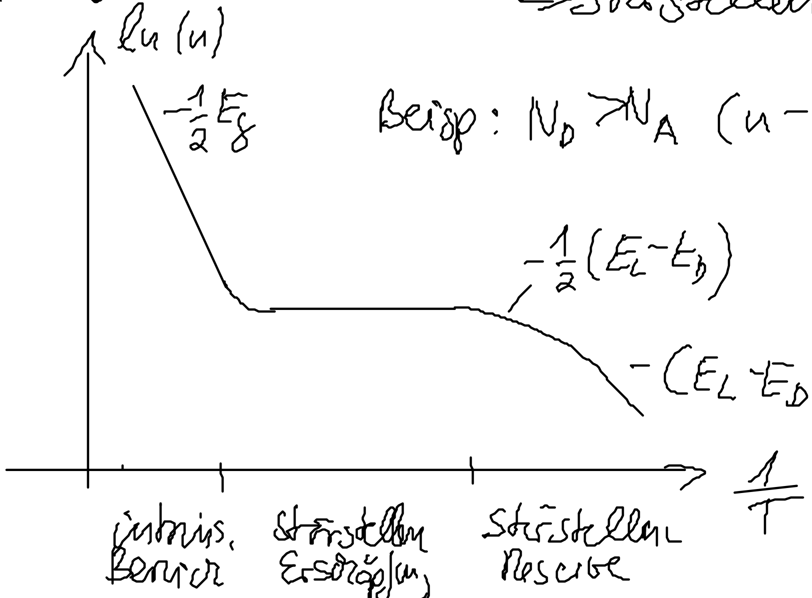
Falls $n_i \lll |N_D - N_A|$: • μ weicht viele kT von μ ab

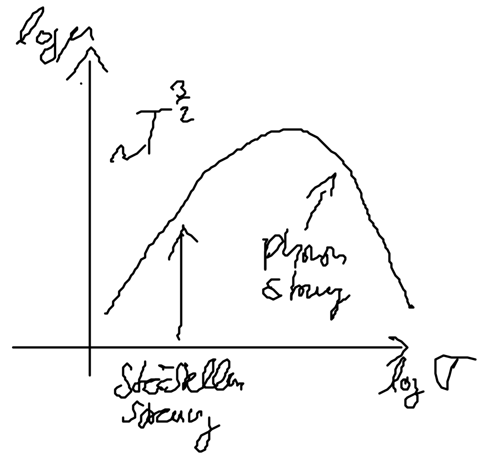
μ liegt im Bereich von E_D oder E_A

• Donatoren und Akzeptoren nicht mehr vollst. Ionisiert

Messung z.B. mit Hall-Effekt $\Rightarrow$ Störstellenreserve

Beisp: $N_D > N_A$ (n-HL)





Leitfähigkeit $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$ (isotropes Medium)

Beweglichkeit $\mu = \frac{e}{m^*}\tau$, Nichtentartete HL: $E_L - \mu \gg kT$

$\mu \sim \tau$, $\frac{1}{\tau} \sim$ Streuwahrscheinlichkeit $\Sigma \sim \langle v \rangle$ (bei Metallen $v = v_F = \text{const}$)

MB-Statistik: $\langle v \rangle \sim \sqrt{T}$

Streuprozesse: ① Gitterschw. $T \gg \Theta_D$, $\Sigma \sim \langle n_{ph} \rangle \sim T$

$\Rightarrow \frac{1}{\tau_{ph}} \sim \sqrt{T} \cdot T \sim T^{\frac{3}{2}} \Rightarrow \mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$

② geladene Störstellen („Rutherford"): $\Sigma_{St} \sim N_{St} \cdot \langle v \rangle^{-4} \Rightarrow \frac{1}{\tau_{ph}} \sim \sqrt{T}\, T^{-2}$

$\Rightarrow \mu \sim T^{\frac{3}{2}}$