

## 5.2.5 Zusammenfassung Kapitel 5.2

### Dotierung

- ▶ Alle Kristallgitterdefekte haben elektronische Zustände, die lokal von denen des Wirtskristalls verschieden sind.
  - Diese Zustände können auch in der Bandlücke liegen; Elektronen können dann am Ort des Defekts Gesamtenergien haben, die sonst nicht erlaubt sind.
- ▶ Die elektronischen Effekte von substitutionellen Fremdatomen der Gruppe **III** oder **VI** sind besonders leicht zu verstehen:
  - ▶ Gruppe **V** Atome (gebräuchlich sind **P** und **As** in **Si**) haben ein Elektron *zuviel*, das nach Absättigung der Bindungen mit den **4 Si** Nachbarn nur noch ganz lose an das Gruppe **V** Atom gebunden ist.
    - Eine geringe Energiezufuhr wird ausreichen, um das **5.** Elektron zu lösen = ins Leitungsband zu transferieren.
    - Damit ist einsichtig, daß Gruppe **V** Atome ein Energieniveau dicht unterhalb der Leitungsbandkante einführen, das *entweder* mit einem Elektron besetzt ist (das Gruppe **V** Atom ist dann elektrisch neutral) *oder*, nach Abgang des Elektrons ins Leitungsband, nicht besetzt ist (dann ist das Gruppe **V** Atom einfache positiv ionisiert).
  - ▶ Gruppe **III** Atomen (gebräuchlich in **Si** ist nur **B**) fehlt ein Elektron, sie werden unvermeidlich ein Loch im Valenzband "mitbringen".
    - Die Konzentration von Löchern und Elektronen im Leitungs- bzw. Valenzband berechnet sich nach wie vor mit unserer Hauptformel

$$n_L = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot f(E, E_F, T) \cdot dE \approx N_{\text{eff}}^L \cdot \exp - \frac{E_L - E_F}{kT} = N_{\text{eff}}^L B(E_L - E_F, T)$$

$$n_V = \int_{-\infty}^{E_V} D(E) \cdot [1 - f(E_D, E_F, T)] \cdot dE \approx N_{\text{eff}}^V \cdot \exp - \frac{E_F - E_V}{kT} = N_{\text{eff}}^V B(E_F - E_V, T)$$

, wobei  $B(E_L - E_F, T)$  die Boltzmann-Verteilung ist

- ▶ Der einzige Unterschied zum intrinsischen Fall ist:
  - Wir haben jetzt Zustände für Elektronen in der Bandlücke; einfach gegeben durch die Konzentration der Dotieratome und ihre energetische Lage in der Bandlücke.
  - Die Lage der Fermienergie in der Bandlücke ändert sich.

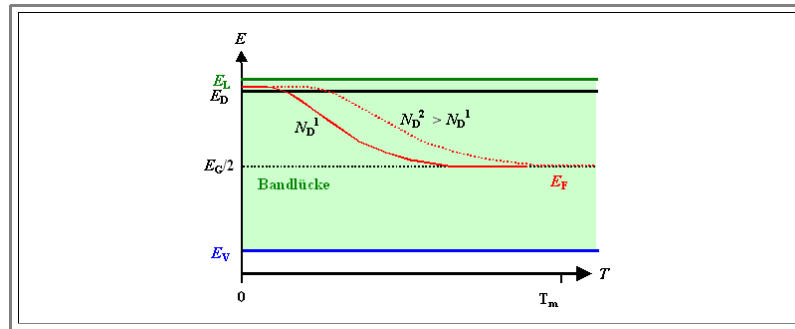
### Lage der Fermienergie

- ▶ Die Fermienergie ergibt sich im Prinzip einfach durch eine Gleichung mit der einzigen Unbekannten Fermienergie weil (globale) Ladungsneutralität immer eingehalten werden muß.
  - Die zu betrachtenden Ladungen sind die negativ geladenen (beweglichen) Elektronen im Leitungsband, die positiv geladenen (beweglichen) Löcher im Valenzband, die positiv geladenen (ortsfesten) Donatoratome, die ihr Elektron ins Leitungsband gegeben haben, und die negativ geladenen (ortsfesten) Akzeptoratome, die ein Elektron aus dem Valenzband aufgenommen haben (und damit ein Loch ins Valenzband gegeben habe). In Formeln:

Negativ		Positiv	
Art	Formel	Art	Formel
Elektronen in L	$n_L = N_{\text{eff}}^L \cdot B(E_L - E_F, T)$	Löcher in V	$n_V = N_{\text{eff}}^V \cdot B(E_F - E_V, T)$
negativ ionisierte Akzeptoren	$N_A^- = N_A^L \cdot f(E_A, E_F, T)$	positiv ionisierte Donatoren	$N_D^+ = N_D \cdot \{1 - f(E_D, E_F, T)\}$

Die resultierende transzendente Gleichung für  $E_F$  ist aber analytisch nicht lösbar; über Näherungen oder Numerik ergibt sich aber das grundsätzliche Verhalten:

- Bei kleinen/mittleren Temperaturen liegt die Fermieergie im Bereich des dominierenden Dotierstoffniveaus; mit zunehmender Temperatur wandert es in Richtung Bandmitte. Quantitativ sieht das (für Donatoren) etwa so aus:



## Definitionen; Massenwirkungsgesetz und Näherungen

Dotierte Halbleiter enthalten grob verschiedene Elektronen- und Löcherkonzentrationen; die dominierende Ladungsträgersorte heißt Majoritäts(ladungsträger), die andere entsprechend Minoritäts(ladungsträger).

- Halbleiter mit mehr Elektronen als Löcher heißen **n**-Typ, **n**-dotiert oder **n**-leitend
- Halbleiter mit mehr Löcher als Elektronen heißen **p**-Typ, **p**-dotiert oder **p**-leitend

Wir können verschiedene Näherungen für die Konzentrationen der Ladungsträger verwenden:

- Die Konzentration der Majoritäten ist im "mittleren" Temperaturbereich (alle Dotieratome ionisiert, aber noch keine nennenswerte Generation aus dem Valenzband) gleich der Konzentration der Dotieratome; damit ist die Lage extrem einfach geworden.
- Die Konzentration der Minoritäten ergibt sich immer aus dem Massenwirkungsgesetz:

$$n_L \cdot n_V = n_i^2$$

$$n_{\min} = \frac{n_i^2}{N_{\text{Dot}}}$$

Es gibt eine Reihe von Näherungsformeln für die Majoritätskonzentration (Aufpassen; oft falsch), die beste ist

$$n_{\text{Maj}} (\text{mittlere } T) = \frac{2N_{\text{Dot}}}{1 + \left( 1 + \frac{4 \cdot N_{\text{Dot}}}{N_{\text{eff}}^{L, V}} \cdot \exp \frac{(-) E_L (V) - E_D (A)}{kT} \right)^{1/2}}$$