

5.1.4 Zusammenfassung Kapitel 5.1

Intrinsische Halbleiter

Die Ladungsträgerdichte im Energieintervall ΔE bestimmt sich immer aus der "Master"gleichung

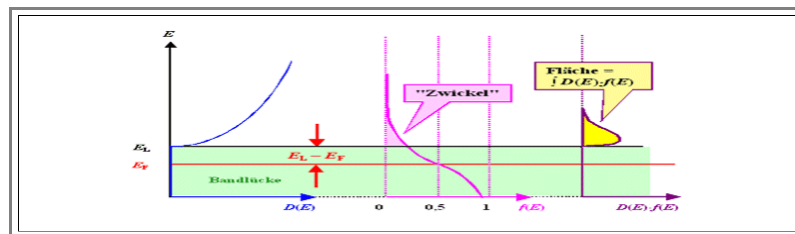
$$n(E, T) = D(E) \cdot f(E, T) \cdot \Delta E$$

Die gesamte Elektronendichte im Leitungsband ist damit

$$n_L(T) = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot f(E, T) \cdot dE = \left(\frac{m_e \cdot kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \cdot \exp - \frac{E_L - E_F}{kT} = 4.8 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \cdot \exp - \frac{E_L - E_F}{kT} \text{ cm}^{-3}$$

Wobei wir zum "Knacken" des bestimmten Integrals die Zustandsdichte des freien Elektronengases und die Boltzmannnäherung für die Fermiverteilung verwendet haben.

Für den Zahlenwert der Elektronendichte ist also der "Schwanz" der Fermiverteilung im Leitungsband viel wichtiger als die genaue Zustandsdichte; das macht man sich am besten mit dem "Zwickelbild" der Ladungsträgerdichte klar:



Die Dichte der **Löcher im Valenzband** muß zwar im intrinsischen Halbleiter genau so groß sein wie die der Löcher im Leitungsband, wir können sie aber auch unabhängig durch die entsprechende Formel für Löcher errechnen und erhalten

$$n^h_V(T) = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot [1 - f(E, T)] \cdot dE = 4.8 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \cdot \exp - \frac{E_F - E_V}{kT} \text{ cm}^{-3}$$

Die Ladungsträgerdichten ändern sich jedenfalls exponentiell mit der Fermienergie; die **Lage der Fermienergie** ist also der entscheidende Parameter.

Sowohl die Rechnung (aus $n^e_L(E_F) = n^h_V(E_F)$ oder allgemeiner: aus Ladungsneutralität) als auch die Anschauung im "Zwickelbild" führt sofort zur Erkenntnis:

Die Fermienergie des intrinsischen Halbleiters muß in der Mitte der Bandlücke liegen.

Ein realer intrinsischer Halbleiter hat natürlich eine reale Zustandsdichte, die von der Zustandsdichte des freien Elektronengases abweicht.

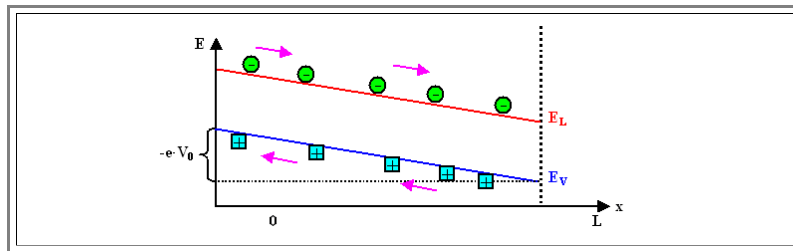
Dies wird einfach durch die Angabe einer (gemessenen) (noch temperatureabhängigen) effektiven Zustandsdichte über alles N_{eff} berücksichtigt; für **Si** liegt sie z.B. im Bereich $(3 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{21}) \text{ cm}^{-3}$

Die Ladungsträgerdichte bestimmt im wesentlichen die **Leitfähigkeit**, insbesondere ihre exponentielle Temperaturabhängigkeit, da die Beweglichkeit relativ konstant ist.

Wichtig ist, die "Löcherleitung" im Valenzband zu berücksichtigen. Dies führt auf eine sehr wichtige Erkenntnis:

Löcher verhalten sich für alle praktischen Zwecke wie positiv geladene Elektronen; man kann ihnen Ladung, Masse, Beweglichkeit, Stöße mit Phononen etc. zuschreiben - genau wie Elektronen auch.

Die Darstellung der Stromleitung im Banddiagramm führt auf eine fundamental neue Erkenntnis:



- Die elektrostatische potentielle Energie, die immer mit der für Stromleitung notwendigen Spannung = Potentialdifferenz = Gradient eines elektrischen Feldes verbunden ist, addiert sich lokal zur Gesamtenergie mit der Konsequenz, daß die Bänder jetzt "verbogen" sind. Damit ergibt sich ein ungeheuer wichtiger Merksatz inkl. Umkehrung:

**Elektrische Felder verursachen Bandverbiegungen
Verbogene Bänder enthalten ein elektrisches Feld**

- Die Graphik suggeriert exakt was geschehen wird: Elektronen laufen den Berg hinunter in Richtung kleinere Energie, Löcher laufen nach oben.
 - Eine Fermienergie im strengen Sinne gibt es nicht mehr, da kein Gleichgewicht mehr vorliegt.
 - Damit der obige Zustand zeitlich stationär sein kann, muß jetzt eine Ladungspumpe (= Spannungsquelle) die Elektronen am rechten Ende aufnehmen und nach rechts oben "zurückschaufeln".
 - Für die Löcher geht das nicht. Hier muß die Spannungsquelle Elektronen bereitstellen, die die ankommenden Löcher aufnehmen und per Rekombination "vernichten".