

# Übung 9.1-1

## Schnelle Fragen zu

### 9.1 Ladungsträgerdichte und Leitfähigkeit

#### Schnelle Fragen zu 9.1.1: Elektronen, Löcher und intrinsische Ladungsträgerdichte

- Beschreibe Elektronen und Löcher im Leitungs- bzw. Valenzband im Ortsraum. Verwende eine schematische Darstellung des **Si**-Kristalls, das die **4** kovalenten Bindungen eines **Si** Atoms zeigt mit den zwei Elektronen pro Bindung.
- Warum sind Elektronen im Valenzband nicht beweglich, die Löcher aber schon? Hätte man die Unbeweglichkeit der Elektronen im Valenzband auch schon bei den oft verwendeten Potentialdarstellungen wie im [Link](#) sehen können, und falls ja, warum?
- Schreibe die ganz allgemeine Gleichung für die Gesamtdichte der Elektronen im Leitungsband eines Halbleiters mit Zustandsdichte  $D_L(E)$  und Fermienergie  $E_F$  gefolgt von sinnvollen Näherungen.
- Erläutere das Konzept der Löcher und warum sie wie positiv geladene Elektronen behandelt werden können. Diskutiere (in Formeln wo sinnvoll)
  - Konzentration.
  - Besetzung von Zuständen.
  - Beweglichkeit.
  - Beitrag zur Leitfähigkeit.
  - Vorzeichen.
  - Wie Stromfluss durch Löcher in einem Halbleiter zu Stromfluss durch Elektronen im Metall-Anschlussdraht paßt.
- Zeige, dass folgender Zusammenhang gilt, und dass daraus die [Endgleichung](#) für die Löcherdichte im Rückgrat folgt:

$$1 - f(E_V; E_F, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)} \approx \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

- Leite das Massenwirkungsgesetz  $n_L \cdot n_V = n_i^2$  her.
- Zeige mit Formeln, dass für *intrinsische* Halbleiter die Fermienergie in der Mitte der Energielücke liegen *muß*; d.h.  $E_F = (E_L + E_V)/2$ . Diskutiere (oder rechne), was passieren würde, falls die effektiven Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband verschieden groß sind.
- Berechne die intrinsische Ladungsträgerdichte in Halbleitern mit effektiver Zustandsdichte (in **V** und **L**) von  $N_{\text{eff}} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und Bandlücken von **0,5 eV**, **1 eV**, **2 eV** und **4 eV**.

#### Schnelle Fragen zu 9.1.2: Darstellung der Stromleitung im Banddiagramm

- Welche (Teil) Ströme fließen (qualitativ) durch einen beliebigen herausgegriffen Querschnitt eines Stückes **Si**, das bei **RT** im Dunkeln nur so rumliegt. Was ist der Nettostrom?
- Was passiert mit der Energie der Elektronen in in einem Material, wenn man es mit einer Spannungsquelle verbindet.
- Zeichne das Banddiagramm eines *Metall*drahtes mit konstantem Querschnitt, bei dem ein Ende auf **-1 V** liegt und das andere auf **0 V** (= Masse). Wie kann man den fließenden Strom graphisch darstellen?
- Zeichne das Banddiagramm eines *Halbleiter*drahtes (*intrinsisch*) mit konstantem Querschnitt, bei dem ein Ende auf **-1 V** liegt und das andere auf **0 V** (= Masse). Wie kann man den fließenden Strom graphisch darstellen?
- Zeichne das Banddiagramm eines *Halbleiter*drahtes (stark *p-leitend*) mit konstantem Querschnitt, bei dem ein Ende auf **-1 V** liegt und das andere auf **0 V** (= Masse). Wie kann man den fließenden Strom graphisch darstellen?
- Warum ist eine *Bandverbiegung* immer mit einem *elektrischen Feld* gekoppelt?

- **Schwierige Frage:** Zeichne das Banddiagramm eines Halbleiters, den man zwischen zwei auf Spannung liegenden Kondensatorplatten steckt, die mit einem sehr dünnen Isolator überzogen sind. **Hinweis:** Kein Strom = Gleichgewicht = Fermienergie überall dieselbe.

### 🚩 Schnelle Fragen zu 9.1.3: Dotieren und die Fermienergie

- Beschreibe Elektronen und Löcher im Leitungs- bzw. Valenzband im **Ortsraum** für **dotierte** Halbleiter. Verwende eine schematische Darstellung des **Si**-Kristalls, das die **4** kovalenten Bindungen eines **Si** Atoms zeigt mit den zwei Elektronen pro Bindung.
- Wo müssen die Donator- und Akzeptorniveaus in der Bandlücke ungefähr liegen, damit man von "**Dotieren**" reden kann?
- Sortiere nach folgendem Schema nach **n**-Typ Halbleiter und **p**-Typ Halbleiter und ordne zu: Akzeptoren, **P** Dotierung, Löcher sind Majoritäten, **p-Si**, **B**, Elektronen sind Minoritäten, Fermienergie in der Nähe des Leitungsbandes, **P-Si**,  $N_{Don} \gg N_{Akz}$ ,  $n_h \gg n_e$ .

Parameter	n-Typ	p-Typ
Akzeptoren	x (Kreuz) hier	....oder hier?
<b>P</b> Dotierung		
...		

- Wo muss die Fermienergie aus qualitativ einsichtigen Gründen bei **p**-Typ Halbleitern und rel. tiefen Temperaturen liegen? Skizze und Erläuterung.
- Skizziere für **Si** (Bandlücke = ? eV) in einem  $\log(n_{maj}) - 1/T$  Diagramm (= Arrhenius Diagramm) die quantitativen (dann [Aufgabe 9.1-2](#)) oder hier nur qualitativen Kurven für:

- $n_i = N_{eff} \cdot \exp(-E_g/2kT)$
- $n_e = N_{Don} \cdot \exp(-E_D/kT)$
- $n_e = N_{Don}$

Ein typisches Donatorniveau liegt um **0.05 eV** unterhalb der Leitungsbandkante. Für  $N_{eff}$  kann man  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  verwenden. Dotierkonzentrationen liegen typischerweise im Bereich  $(10^{15} - 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$ .

- Wie groß ist in **dotiertem Si** bei **RT** die Majoritätsladungsträgerkonzentration und die Minoritätsladungsträgerkonzentration in guter Näherung (Formeln!)? Was passiert **qualitativ** bei sehr großen und sehr kleinen Temperaturen?
- Wenn die Ladungsträgerdichte **größer** werden soll als in der [einfachen Gleichung](#)  $n_L(\text{Dot}) = N_{Don} \cdot \exp(-E_L - E_{Don} / 2kT)$  für Dotieren bei tiefen Temperaturen gegeben, dann muss die Fermienergie - ja was wohl?
- Wie wird **p**-dotiert? Dazu führe man die für [n-Dotieren gemachten Überlegungen](#) für ein Dotierniveau dicht oberhalb des Leitungsbandes (beim **Si** immer durch **Bor** Dotierung verursacht) durch - mit Skizze und Formeln.
- Bei der Temperatur, bei der die **intrinsische** Ladungsträgerdichte ungefähr den Wert  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  erreicht hat, hat auch der betreffende Halbleiter das Ende seines Arbeitstemperaturbereichs erreicht. Warum? Wo liegt diese Temperatur so ungefähr für die in der [Tabelle](#) gezeigten Halbleiter?