

## Zusammenfassung 8 - Ladungstransport in Festkörpern, Elektrische Eigenschaften

- In Festkörpern soll das Potential die Periodizität des Gitters wiedergeben, d.h.  $V(x+a) = V(x)$ . So ein Modell wird von Kronig-Penney vorgeschlagen, in dem es periodisch Barrieren mit endlicher Höhe  $V_0$  und dazwischen (um die Atomkerne) Potentialtöpfe mit  $V=0$  gibt (siehe Bild 4.2 im Skript).
- Für dieses Modell kann man die Schrödinger-Gleichung lösen und die erlaubten Energiebänder bestimmen. Dafür wird eine sogenannte Barrierestärke  $P$  definiert, und es gilt  $P \sim V_0$  (siehe Skript S.85-88).
- In Abhängigkeit von  $P$  ergeben sich 3 Fälle:
- $P \rightarrow 0$  (keine Barriere): In diesem Fall sind alle Energiewerte für die Elektronen erlaubt.
  - $0 < P < \infty$  (endlich hohe und breite Barrieren): In diesem Fall gibt es endlich Breite erlaubter Energiebänder. Die restlichen Energien sind verboten.
  - $P \rightarrow \infty$  (unendlich hohe Barriere): In diesem Fall dürfen die Elektronen nur diskrete Energiewerte annehmen.

→ Für freie Elektronen gilt:  $E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ , wobei  $k$  der Wellenvektor ist. Dieser Verlauf von  $E(k)$  gilt aber für Elektronen im periodischen Gitterpotential nicht. Um den abweichenden Verlauf darzustellen, führt man die Größe  $m^*$  (= effektive Masse) ein:

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E(k)}{dk^2}}$$

→ Da  $\frac{d^2 E(k)}{dk^2}$  die Krümmung der  $E(k)$ -Kurve beschreibt, berücksichtigt  $m^*$  den Einfluß des Kristallgitters auf die Bewegung der Elektronen. Also kann man die Formeln, die für freie Elektronen gelten, auch für Elektronen im Festkörpern mit periodischem Gitterpotential benutzen, indem die Masse  $m$  mit der effektiven Masse  $m^*$  ersetzt wird.

→ Es gilt auch natürlich, dass die effektive Masse steigt wenn die Krümmung von  $E(k)$  abnimmt und andersum.

→ Man kann mithilfe seines Bänderschemas beurteilen, ob ein Festkörper ein Isolator, Halbleiter oder Metall ist. Die vollgefüllten Bänder tragen der elektrischen Leitfähigkeit nicht bei, da alle Zustände besetzt sind und Elektronen sich nicht bewegen können. Deshalb sind die teilweise gefüllten Bänder für die el. Leitfähigkeit verantwortlich. Aus diesem Grund soll man den Bandabstand  $E_g$  zwischen dem letzten vollgefüllten und dem ersten ungefüllten Band betrachten. Je größer  $E_g$  ist, desto schwieriger kann man die Elektronen vom vollgefüllten Band in das ungefüllte anregen. Deshalb gilt:

- Bei Isolatoren ist  $E_g$  sehr groß, es können praktisch keine Elektronen angeregt werden.
- Bei Halbleitern ist  $E_g$  relativ klein ( $\approx 1\text{eV}$ ) und einige Elektronen können angeregt werden.
- Bei Metallen gilt  $E_g \approx 0$ , oder die Bänder überlappen sich, d.h. ohne Anregung sind viele Elektronen verfügbar.

→ Zur elektrischen Leitfähigkeit der Metalle tragen nur die Elektronen im Leitungsband bei. Ohne ein äußeres Feld sind diese Elektronen im  $k$ -Raum gleichmäßig verteilt. Wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, wird diese gleichmäßige Verteilung gestört und es ergibt eine elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{e^2 \tau}{m^*} \cdot n \quad \text{mit} \quad \tau: \text{Streuzeit} \\ n: \text{Elektronendichte}$$

→ Die Leitfähigkeit wird durch zwei Streuprozessen beeinflusst:

1) Streuung an Phononen: Diese ist temperaturabhängig. Der spezifische Widerstand durch diese Streuung  $\rho_{ph}$  steigt mit zunehmender Temperatur. Nahe der Raumtemperatur gilt  $\rho_{ph} \sim T$ , ( $\rho = \rho_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C}))$  mit  $\alpha$ : Temperaturkoeff.). Für tiefe Temperaturen gilt ( $\rho \sim T^5$ ).

2) Streuung an Fremdatomen: Diese spielt vor allem bei tiefen Temperaturen eine bedeutende Rolle. Der spezifische Widerstand durch diese Streuung  $\rho_i$  nimmt zu, wenn das Metall verunreinigt wird.

→ Für den spezifischen Widerstand  $\rho$  gilt die Matthiessen'sche Regel:  $\rho = \rho_i + \rho_{ph}$

→ Leiterwerkstoffe: Ag und Au sind die besten Leiter aber teuer. Deshalb werden Cu und Al und auch Legierungen <sup>meistens</sup> verwendet.

→ Widerstandswerkstoffe: Es gibt zwei wichtigen Widerstandstypen, nämlich Präzisions- und Heizwiderstände. Für beide gibt es eine Reihe Forderungen, die im Skript zu finden sind.

→ Kontaktwerkstoffe: Diese sind als Übergänge zweier gleicher oder verschiedener Metalle benutzt. Die Forderungen sind im Skript auf S. 100 zu finden. Wenn ~~bei~~ Kontakt 2 verschiedene Metalle vorhanden sind, dann gleichen sich die Fermi-niveaus beider Metalle aus und es bildet sich ein Kontaktpotential  $E_c = \Phi_1 - \Phi_2$ , wobei  $\Phi_i$  die Austrittsarbeit des i-ten Metalls ist.

→ Metalle sind in Form von positiven Ionen im Wasser löslich. Damit wird aber das Metall negativ und es entsteht ein elektrisches Feld, das den Lösungsprozess zu einem Gleichgewicht führt. Das dabei gebildete Potential ist für ~~verschiedene~~ verschiedene Metalle anders und ~~das~~ das Potential verschiedener Metalle wird in einer sog. „elektrochemischen Spannungsreihe“ zusammengefasst.

→ Wenn es zwei Metallelektroden in einer Lösung gibt, dann wird kein Gleichgewicht erreicht. Das unedlere Metall gibt mehrere positive Ionen ab, das aber mit OH<sup>-</sup>-Ionen des Wassers kompensiert wird. Dieser Prozess läuft weiter, falls OH<sup>-</sup>-Ionen an der Oberfläche des unedlen Metalls keine Schutzschicht (Korrosion) bilden.

→ Elektronen tragen in Metallen nicht nur zur elektrischen Leitfähigkeit aber auch immer zur Wärmeleitfähigkeit bei. Wenn auf dem Metall keine homogene Temperaturverteilung vorhanden ist, dann diffundieren die negativen Ladungen zum kalten Ende und die positiven bleiben am warmen Ende. Dadurch entsteht ein zur Diffusion entgegengerichtetes elektrisches Feld. Damit gleichen sich die beiden ~~Stromdichten~~  $j_{diff}$  und  $j_e$  aus. Das führt zu folgender Gleichung:

$$E = S \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{mit } S: \text{ Seebeckkoeffizient (Thermokraft)} \Rightarrow \Delta U = S \cdot \Delta T$$

→ In einem Thermoelement werden zwei Metalle mit unterschiedlichen S miteinander verbunden und die sich dabei erstellende Thermospannung wird gemessen (siehe Bild 5.8 im Skript).

→ Bei sogenannten Peltier-Elementen wird von dem Peltier-Effekt <sup>nutz</sup> genutzt gemacht. Das bedeutet, dass die Energie der Elektronen an einem Übergang von einem zu einem anderen ~~Metall~~ <sup>Halbleiter</sup> sich ändert. Diese Energie wird <sup>bspw.</sup> beim Übergang A → B freigesetzt ~~und~~ <sup>Heizung</sup> und beim Übergang B → A wieder aufgenommen <sup>Kühlung</sup>. Der Grund dafür ist, dass  $S_A$  und  $S_B$  bzw.  $\Pi_A$  und  $\Pi_B$  unterschiedlich sind. Es gilt für die Peltierkonstante  $\Pi$ :

$$\Pi = S \cdot T$$

Die Peltierkonstante ist die Proportionalitätskonstante zwischen der Wärmestromdichte  $w$  und der elektrischen Stromdichte  $j$ :

$$w = \Pi \cdot j$$

⇒ Wenn  $\Pi_A > \Pi_B$  gilt, dann findet beim Übergang A → B die Heizung und bei B → A die Kühlung statt.

→ Eine Stromdichte  ~~$j$~~  kann ~~im Falle~~ im Falle eines konstanten Stroms  $I$  auf der Fläche  $A$  wie folgt definiert werden

$$j = \frac{I}{A}$$