Übungen zur Festkörperphysik I

Serie 9: Halbleiter

Verteilung: 19.12.2006 Abgabe: 3.1.2007 Rückgabe: 10.1.2007

Kurzfragen

a) Wie sieht der Temperaturverlauf der Leitfähigkeit eines intrinsischen und dotierten Halbleiters aus?

b) Wie gross ist die Bandlücke in Si, Ge, GaAs bei Zimmertemperatur?

c) Welche Fremdatome sollen in Silizium oder in Germanium eingebaut werden, um n- oder p-Dotierung zu erreichen?

d) Was sind Majoritäts- und Minoritätsladungsträger?

1 Schwere und leichte Löcher

Ein nicht entarteter Eigenhalbleiter (intrinsischer Halbleiter) sei durch ein parabolisches Leitungsband (effektive Elektronenmasse m_n, unterer Bandrand E_C) und zwei parabolische Valenzbänder (effektive Löchermassen m_+ und m_-, gemeinsamer oberer Bandrand E_V) beschrieben. Die entsprechenden Minima und Maxima der Bänder befinden sich bei $k = 0$ (Γ-Punkt). Aus der Neutralitätsbedingung $n = p_+ + p_-$ berechne man die Konzentration der schweren und leichten Löcher p_+ und p_-.
Was ändert sich, wenn, wie in Germanium, das Leitungsbandminimum nicht am Γ-Punkt sondern am L-Punkt liegt?

2 Intrinsische Ladungsträgerkonzentration

Bestimmen Sie die effektiven Ladungsträgerkonzentrationen im Valenzband (p_v) und im Leitungsband (n_c), sowie die intrinsische Ladungsträgerkonzentration n_i für Si und GaAs für $T = 300$ K.
Angaben für Si:
Die effektiven Massen der Ladungsträger im Leitungsband entlang den 3 Hauptachsen sind $m_1 = 0.98m_e$, $m_2 = m_3 = 0.19m_e$. Im Valenzband sind die mittleren effektiven Massen $m_p^l = 0.16m_e$ für die leichten Löcher und $m_p^s = 0.49m_e$ für die schweren Löcher. Energielücke: $E_G = 1.14$ eV.
Angaben für GaAs:
Leitungsband: $m_n = 0.07m_e$; Valenzband $m_p^l = 0.12m_e$, $m_p^s = 0.68m_e$; Energielücke: $E_G = 1.43$ eV.
Hinweis: Für GaAs befinden sich sowohl das Minimum des Leitungsbandes, als auch die Maxima der beiden Valenzbänder im Zentrum der Brillouinzone.

3 Bohrsches Wasserstoffmodell für Störstellen in Halbleitern und entartete Halbleiter

Die Wellenfunktionen wasserstoffähnlicher Donatorzustände erstrecken sich über mehrere Gitterabstände. Wenn die Bohrschen Bahnen benachbarter Donatorelektronen wesentlich überlappen, verliert das Modell lokalisierter Störzellen seine Gültigkeit. Die Wechselwirkung zwischen den Elektronen der Donatoren bewirkt eine Aufspaltung des Störniveaus. Es entsteht dann ein Störband, welches elektrisch leitet.
Die Verbindung InSb wird mit Tellur (Te) dotiert.
Man schätze für InSb (Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 17, m^* = 0.014 m_e$) die folgenden Grössen ab:

a) Die Ionisierungsenergie eines Te-Niveaus.

b) Den Radius der ersten Bohrschen Bahn.

c) Die minimale Te-Konzentration N_d, bei welcher die Störbandleitung auftritt. (Man nehme an, dass die Störstellen ein einfach kubisches Gitter bilden.) In welchem Temperaturbereich wird diese Störbandleitung wichtig?

Bringt man in ein Halbleitermaterial Donatoren in genügend hoher Konzentration ein, so wird die Leitungsbandkante verschoben und das chemische Potential (das Fermi-Niveau) des Halbleiters befindet sich nicht mehr im Bereich der Bandlücke, sondern im Leitungsband. Man spricht dann von einem entartet dotierten Halbleiter. Wie gross muss man die Donatorkonzentration in Si typischerweise wählen, damit entartete Dotierung vorliegt? (Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_{\mathrm{Si}} = 11.7$, $m_{\mathrm{Si}} = 0.33 m_e$)

4 Maximal erreichbarer Widerstand von Ge bei Zimmertemperatur

Man schätze den maximalen, durch p-Dotierung erreichbaren, spezifischen Widerstand $\rho_{\max}$ von Germanium (Ge) bei Zimmertemperatur ab. Die Eigenleitfähigkeit σ_i beträgt bei dieser Temperatur $1/57\ (\Omega\ \mathrm{cm})^{-1}$; die Beweglichkeit für Leitungselektronen resp. Löcher ist:

$$b_n = 3800\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs} \qquad \text{resp} \qquad b_p = 1800\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs}$$

Hinweis: Benutzen Sie das "Massenwirkungsgesetz" $n_c p_v = n_i^2$, bestimmen Sie das Extremum von σ als Funktion von p und zeigen Sie, dass es für die angegebenen Parameter ein Minimum ist.

Wir wünschen Ihnen frohe Festtage und einen guten Start ins neue Jahr!
Prof. Bertram Batlogg, Romeo Bianchetti, Martin Goeppl, Parisa Fallahi
Simon Haas, Wolfgang Kalb, Andrea Sacchetti & Matthias Weller