ELEKTRISCHE LEITUNG IN HALBLEITERN

ZIEL

Bestimmung des Bandabstandes von Germanium

ZUSAMMENFASSUNG

Halbleiter weisen erst bei höheren Temperaturen eine messbare elektrische Leitfähigkeit auf. Ursächlich für diese Temperaturabhängigkeit ist die Bandstruktur der elektronischen Energieniveaus mit einem Valenzband, einem Leitungsband und einer Zwischenzone, die bei reinem undotiertem Halbleitermaterial nicht mit Elektronen besetzt werden kann. Mit zunehmender Temperatur werden immer mehr Elektronen thermisch aus dem Valenzband ins Leitungsband aktiviert und hinterlassen „Löcher" im Valenzband. Die Löcher bewegen sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes wie positiv geladene Teilchen und tragen ebenso wie die Elektronen zur Stromdichte bei. Zur Bestimmung der Leitfähigkeit in reinem, undotiertem Germanium wird im Experiment ein konstanter Strom durch den Kristall geschickt und in Abhängigkeit von der Temperatur der korrespondierende Spannungsabfall gemessen. Die Messdaten lassen sich in guter Näherung durch eine Exponentialfunktion beschreiben, in der der Bandabstand als Parameter auftaucht.

AUFGABEN

- **Messung der elektrischen Leitfähigkeit von undotiertem Germanium in Abhängigkeit von der Temperatur.**
- **Bestimmung des Bandabstandes zwischen Valenz und Leitungsband.**

HINWEIS

In der Praxis spielt die intrinsische Leitfähigkeit reiner undotierter Halbleiter eine untergeordnete Rolle. In der Regel weisen die Kristalle Störstellen auf. Häufig werden auch sehr reine Kristalle durch gezielte Dotierung mit Donator- oder Akzeptoratomen leitfähig gemacht.
Der Einfluss dieser Dotierung lässt sich zeigen, wenn die hier vorgestellten Untersuchungen zum Vergleich auch an *p*- und *n*-dotiertem Germanium durchgeführt werden. Die Leitfähigkeit der dotierten Kristalle ist bei Raumtemperatur deutlich größer als die des reinen Kristalls, nähert sich jedoch bei hohen Temperaturen der intrinsischen Leitfähigkeit an, siehe Abb. 3.
Die Temperaturabhängigkeit des Hall-Koeffizienten der verwendeten Germaniumkristalle wird in Experiment UE6020200 näher untersucht.

BENÖTIGTE GERÄTE

Anzahl	Geräte	Art.-Nr.
1	undotiertes Germanium auf Leiterplatte	**1008522**
1	Hall-Effekt, Grundgerät	**1009934**
1	Tonnenfuß, 1000 g	**1002834**
1	Transformator mit Gleichrichter 3/ 6/ 9/12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	**1003316 oder**
	Transformator mit Gleichrichter 3/ 6/ 9/12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	**1003315**
1	Digital-Multimeter P3340	**1002785**
1	Paar Sicherheitsexperimentierkabel, 75 cm	**1002849**
1	Paar Sicherheitsexperimentierkabel, 75cm, rot/blau	**1017718**
Zusätzlich empfohlen		
1	p-dotiertes Germanium auf Leiterplatte	**1009810**
1	n-dotiertes Germanium auf Leiterplatte	**1009760**
1	3B NET*log*™ (230 V, 50/60 Hz)	**1000540 oder**
	3B NET*log*™ (115 V, 50/60 Hz)	**1000539**
1	3B NET*lab*™	**1000544**

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine stark materialabhängige Größe. Es ist daher üblich, Materialien nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit zu klassifizieren. Als Halbleiter bezeichnet man Festkörper, die erst bei höheren Temperaturen eine messbare elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Ursächlich für diese Temperaturabhängigkeit ist die Bandstruktur der elektronischen Energieniveaus mit einem Valenzband, einem Leitungsband und einer Zwischenzone, die bei reinem undotiertem Halbleitermaterial nicht mit Elektronen besetzt werden kann.

Im Grundzustand ist das Valenzband das höchste mit Elektronen besetzte Band und das Leitungsband das nächst höhere, unbesetzte Band. Der Abstand zwischen beiden Bändern wird als Bandabstand E_g bezeichnet und ist eine materialabhängige Größe. Bei Germanium beträgt sie etwa 0,7 eV.

Mit zunehmender Temperatur werden immer mehr Elektronen thermisch aus dem Valenzband ins Leitungsband aktiviert und hinterlassen „Löcher" im Valenzband. Die Löcher – sie werden auch als Defektelektronen bezeichnet – bewegen sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes *E* wie positiv geladene Teilchen und tragen ebenso wie die Elektronen zur Stromdichte

(1) $$j = \sigma \cdot E$$

σ: elektrische Leitfähigkeit des Halbleitermaterials bei (siehe Abb.1). Dabei bewegen sich Elektronen und Defektelektronen mit unterschiedlichen mittleren Driftgeschwindigkeiten

(2) $$v_n = -\mu_n \cdot E \;\text{ und }\; v_p = \mu_p \cdot E$$

μ_n: Beweglichkeit der Elektronen

μ_p: Beweglichkeit der Defektelektronen

Diese durch Anregung von Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband ermöglichte elektrische Leitung wird als Eigenleitung (intrinsische Leitung) bezeichnet.
Die Zahl der Elektronen im Leitungsband entspricht im thermischen Gleichgewicht der Zahl der Defektelektronen im Valenzband. Also lässt sich die Stromdichte bei Eigenleitung schreiben als

(3) $$j_i = -e \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E\,.$$

D.h. die intrinsische Leitfähigkeit ist

(4) $$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)\,,$$

wobei die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte n_i der Elektronen bzw. der Defektelektronen gegeben ist durch

(5) $$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi}{h^2} \cdot \sqrt{m_n m_p} \cdot kT \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

$$k = 8{,}617 \cdot 10^{-5}\,\frac{\text{eV}}{\text{K}}\text{ : Boltzmann-Konstante,}$$

h: Planck'sche Konstante

m_n : Effektive Masse der Elektronen

m_p: Effektive Masse der Defektelektronen

T: Probentemperatur

Auch die Beweglichkeiten μ_n und μ_p hängen von der Temperatur ab. Im Temperaturbereich oberhalb der Raumtemperatur ist

(6) $$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

Der dominierende Term für die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit ist jedoch in jedem Fall durch die Exponentialfunktion gegeben. Daher lässt sich die intrinsische Leitfähigkeit für höhere Temperaturen in der Form

(7) $$\sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

darstellen.
Im Experiment wird zur Bestimmung der Leitfähigkeit in reinem, undotiertem Germanium ein konstanter Strom *I* durch den Kristall geschickt und der korrespondierende Spannungsabfall *U* gemessen. Aus den Messdaten lässt sich wegen der Zusammenhänge

(8) $$U = a \cdot E \;\text{ bzw. }\; I = b \cdot c \cdot j$$

a, b, c Kristallabmessungen

die Leitfähigkeit σ berechnen:

(9) $$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$$

AUSWERTUNG

Gleichung (7) lässt sich umschreiben in die Form:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2} \cdot \frac{1}{kT}$$

Man trägt daher $y = \ln\sigma$ gegen $x = \frac{1}{kT}$ auf und bestimmt den Bandabstand E_g aus der Steigung der resultierenden Geraden.

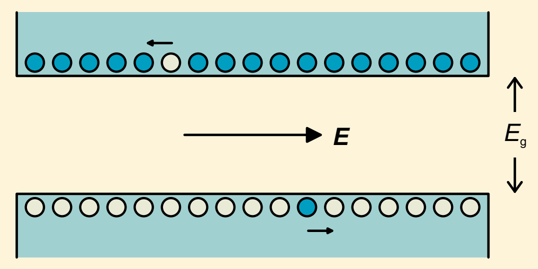

Abb. 1: Bandstruktur des Halbleiters mit einem Elektron im Leitungsband und einem Defektelektron im Valenzband, die unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes *E* driften

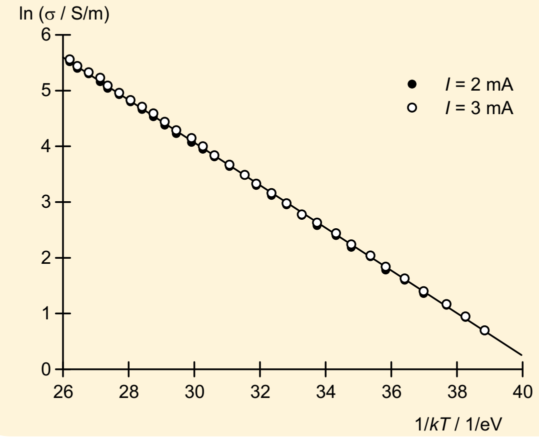

Abb. 2: Darstellung zur Bestimmung des Bandabstandes E_g in Germanium

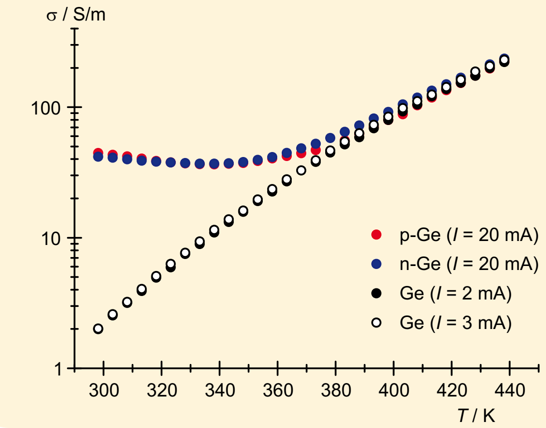

Abb. 3: Vergleich der Leitfähigkeiten von reinem und dotiertem Germanium