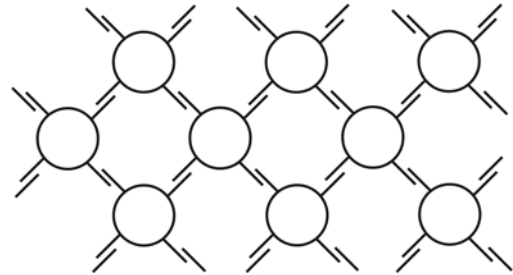


## Bandabstand von Germanium

Stichworte: Leitfähigkeit, Bändermodell der Halbleiter, Eigenleitung, Störstellenleitung, Dotierung

### 1 Einführung und Themenstellung

Sehr reine, undotierte Halbleiter verhalten sich bei sehr tiefer Temperatur wie Isolatoren. Im Kristallgitter (Diamantstruktur) eines Elementhalbleiters wie *Si* oder *Ge* bilden alle Valenzelektronen (4 pro Atom) kovalente Elektronenpaarbindungen zwischen den 4-wertigen Atomen.

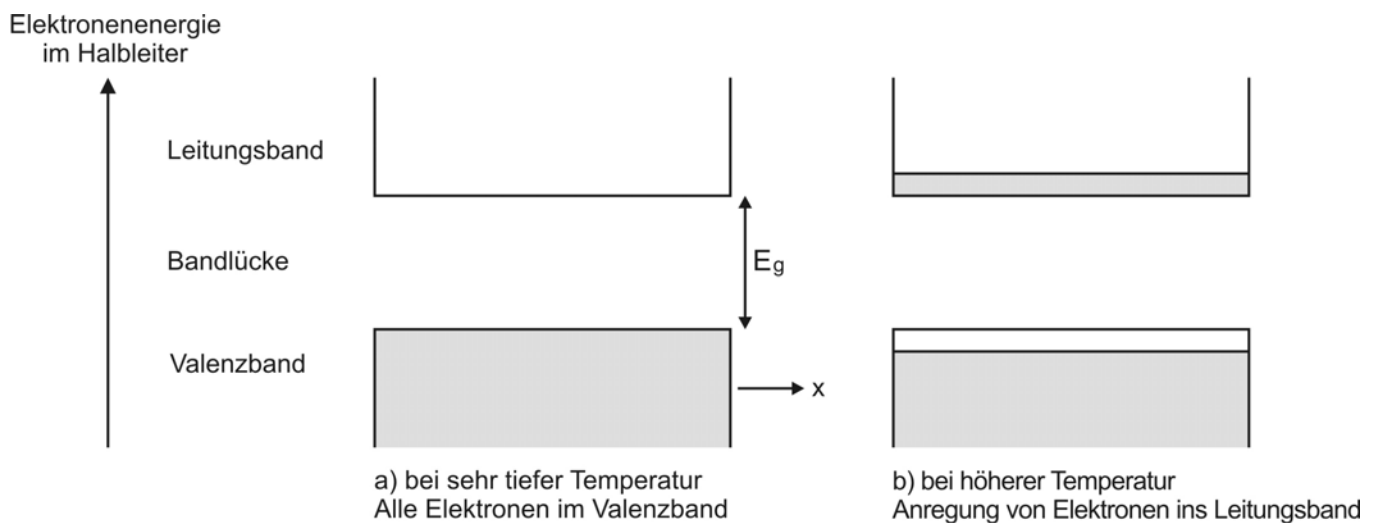


Bei zunehmender Temperatur treten Gitterschwingungen auf. Die Schwingungsenergie ist statistisch über die Atome verteilt. Dabei kommt es vor, dass bei einigen Atomen die Schwingungsamplitude so groß wird, dass dort die Bindung zu den Nachbaratomen aufbricht. Das vorher eine Valenzbindung ausübende Elektron ist damit frei geworden und kann sich im Kristall bewegen, es kann einem elektrischen Feld folgen und dabei einen Stromfluss bewirken. Das undotierte Halbleitermaterial wird somit bei zunehmender Temperatur zunehmend leitfähig, es ist eigenleitend.

Im Energiebänderschema oder Bändermodell der Halbleiterphysik werden die Elektronen nach ihrer Energie klassifiziert. Elektronen in Valenzbindungen besetzen das energetisch tiefe Valenzband. (Wie in der Quantenmechanik gezeigt wird, können nicht alle Elektronen im Kristall auf dem gleichen Energieniveau sein; die Energiewerte verteilen sich über einen Bereich, das Energieband.)

Elektronen im freien Zustand, Leitungselektronen, haben wegen ihrer Anregung höhere Energie; sie besetzen das Leitungsband.

Zwischen den beiden Energiebändern besteht eine Lücke mit der energetischen Höhe  $E_g$ , dem Bandabstand. In dieser Bandlücke, auch „verbotenes Band“ genannt, gibt es keine von Elektronen besetzbare Energiezustände.



Die Wahrscheinlichkeit zur thermischen Anregung und damit die Konzentration  $n$  freier Elektronen im Leitungsband wird beschrieben durch eine exponentielle Funktion

$$n(T) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad \begin{array}{l} k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K (Boltzmann - Konstante)} \\ T = \text{absolute Temperatur} \end{array} \quad (1)$$

Im Versuch wird der elektrische Widerstand eines Halbleiterstücks aus Germanium in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Mit höherer Temperatur werden mehr Elektronen in das Leitungsband angeregt und vergrößern den Stromtransport. Aus dem gemessenen Verlauf lässt sich der Bandabstand  $E_g$  zwischen Valenzband und Leitungsband bestimmen.

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Im Ohmschen Gesetz für den Stromtransport beschreibt der Widerstand  $R$  eine vom Material und der Probenform abhängige Größe:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\kappa A} \quad (2)$$

Die materialabhängige Größe  $\kappa = \frac{1}{\rho}$  ist die spezifische Leitfähigkeit, sie ergibt sich zu

$$\kappa = q \cdot n \cdot \mu \quad \begin{array}{l} q = \text{Ladung (} q = -e \text{ für Elektronen, } q = +e \text{ für Löcher)} \\ n = \text{Ladungsträgerkonzentration bzw. Konzentration freier Elektronen} \\ \mu = \text{Beweglichkeit der Ladungsträger} \quad \mu = \frac{v}{E} \end{array} \quad (3)$$

Je größer die Beweglichkeit, desto größer ist die Transportgeschwindigkeit der Ladungsträger beim Stromfluss.

In Metallen ist  $n = \text{konst.}$ , jedes  $z$ -wertige Metallatom stellt  $z$  Valenzelektronen als Leitungselektronen bereit. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands ist bei Metallen von der Beweglichkeit bestimmt. In Halbleitern kann sich  $n$  mit der Temperatur ändern durch Aufbrechen von Gitterbindungen bzw. Anregung ins Leitungsband.

### 2.2 Halbleiter im eigenleitenden und dotierten Zustand

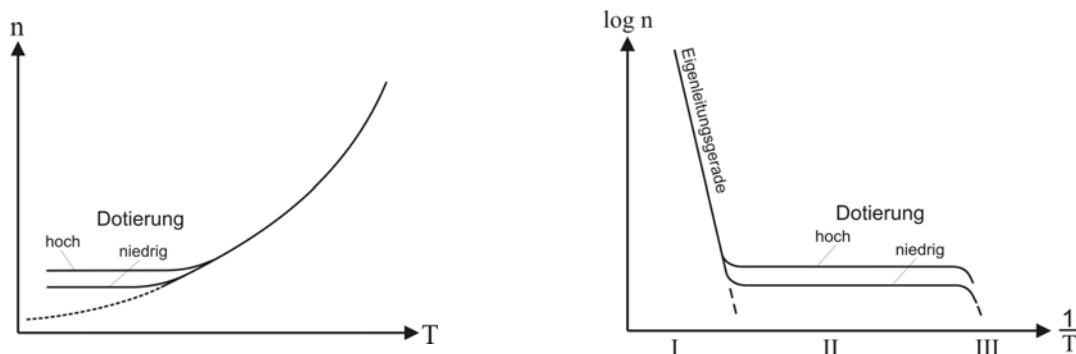
Für einen praktisch anwendbaren Transistor oder IC darf sich das elektrische Verhalten nur wenig mit der Temperatur ändern. Die Verwendung von "eigenleitendem" Halbleitermaterial, dessen Elektronenkonzentration bzw. Widerstand exponentiell temperaturabhängig ist, kommt dafür nicht in Frage. Man verwendet deshalb für solche Zwecke dotiertes Halbleitermaterial. In das hochreine Grundmaterial wird durch Dotieren eine bestimmte Konzentration von 3- oder 5-wertigen Fremdatomen (Störstellen) eingebaut. Dadurch sind im dotierten Halbleiterkristall zusätzlich zu den Valenzelektronen überschüssige bzw. fehlende Elektronen vorhanden, die zum Stromtransport zur Verfügung stehen.

Der Temperaturgang der Elektronenkonzentration wird im undotierten, eigenleitenden Zustand durch eine Exponentialfunktion beschrieben:

$$n \sim \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (\text{vgl. Gl. 1})$$

im dotierten Zustand ist die Elektronenkonzentration  $n = \text{konst.}$  durch die Dotierung mit Störstellenatomen vorgegeben.

Bei höherer Temperatur tritt auch im dotierten Zustand eine zunehmende thermische Anregung auf, und schließlich, wenn die thermisch angeregten Elektronen überwiegen, mündet die horizontale Gerade für  $n$  in den exponentiellen Verlauf der Eigenleitung ein.



Meist wird der Temperaturgang nicht als  $n(T)$ , sondern in der Form  $\ln(n)$  in Abhängigkeit von  $1/T$  aufgetragen.

Dabei erscheint der exponentielle Verlauf bei Eigenleitung (Bereich I) als fallende Gerade, deren Steigung von  $E_g$  bestimmt ist. Bei Störstellenleitung (Bereich II) ist  $n = \text{konst.}$ ; bei sehr tiefer Temperatur (Bereich III) ist die thermische Energie so gering, dass die zusätzlichen Elektronen von den Störstellenatomen eingefangen werden.

Der Temperaturgang der spezifischen Leitfähigkeit  $\kappa(T)$  verläuft sehr ähnlich zu  $n(T)$ . Es überlagert sich nur der schwache Temperaturgang der Beweglichkeit, die mit zunehmender Temperatur abnimmt. Im Eigenleitungsbereich I überwiegt jedoch das exponentielle Anwachsen der Elektronenkonzentration den Einfluss der Beweglichkeit.

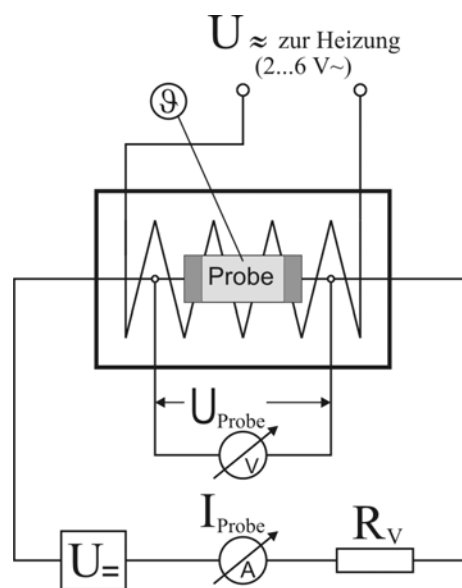
### 3 Aufgabe

- An einer Halbleiterprobe aus Germanium wird zunächst bei Raumtemperatur geprüft, ob an der Probe Strom und Spannung proportional sind, d.h. das Ohmsche Gesetz gilt, und ob sich die Probe durch den Stromfluss allein schon merkbar aufheizt.
- Danach wird aus Strom- und Spannungsmessung der elektrische Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Aus dem Widerstand wird die spezifische Leitfähigkeit ermittelt.
- Die temperaturabhängigen Verläufe werden als Diagramme 2, 3 und 4 aufgezeichnet.
- Aus den Diagrammen ist festzustellen, in welchem Temperaturbereich Störstellenleitung oder Eigenleitung auftritt; aus dem Verlauf im Eigenleitungsbereich wird der Bandabstand  $E_g$  bestimmt.

### 4 Versuchsbeschreibung/Messaufbau

Die Germanium-Probe mit den Abmessungen (20 x 10 x 1) mm ist auf einer Platine befestigt, die auch die benötigten Kontakte trägt. Auf der Rückseite der Platine befindet sich eine Heizwendel. Durch die Heizwendel wird mittels Wechselstrom die Probe erwärmt. Heizspannung zunächst 2V, dann auf 4V und 6V ansteigend; Spannungseinstellung durch Kontaktbügel am Netzgerät.

Die Proben temperatur wird mit einem Thermoelement und Digitalanzeige bestimmt. Zum Schutz gegen unzulässig hohe Proben temperatur (Lötkontakte!) öffnet ein Thermoschalter bei ungefähr 130°C den Heizstromkreis.



Durch die Probe fließt in Längsrichtung ein Gleichstrom. In den Stromkreis wird ein Schutzwiderstand von 180  $\Omega$  geschaltet. Stromstärke und Spannung an der Probe werden gemessen. Daraus werden der Widerstand und die spezifische Leitfähigkeit bestimmt.

## 5 Versuchsdurchführung

Schaltung aufbauen und von der Aufsicht überprüfen lassen.

5.1 Bei Raumtemperatur, ohne Heizung, die Stromstärke durch die Germaniumprobe in Schritten von 5 mA bis auf den maximal zulässigen Wert von 30 mA erhöhen; der Stromwert ist jeweils über 30 s lang konstant zu halten, danach sind Spannung und Temperatur an der Probe abzulesen.

5.2 Stromstärke auf maximal 10 mA einregeln und nachregeln. Heizung einschalten und Probe langsam aufheizen. Mit einer Heizspannung von 2 V beginnen und über 4 V auf 6V steigern, dabei bei Raumtemperatur beginnend in Schritten von 5K Strom und Spannung an der Probe messen.

5.3 Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur und automatischem Öffnen des Heizstromkreises, bei abnehmender Temperatur in Schritten von 10K Strom und Spannung an der Probe messen. (Die Abkühlung erfolgt ziemlich rasch.)

*Notieren Sie die Messunsicherheiten der Messgeräte für eine spätere Auswertung (gegebenenfalls ihre Schätzwerte).*

## 6 Auswertung

### Diagramm 1 (zu Messung 5.1)

Auftragen von Stromstärke  $I$  gegen Spannung  $U$  bei Raumtemperatur.

Prüfen Sie, ob sich eine Gerade (ohmsches Verhalten) ergibt, und ob die Probentemperatur bei höherem Stromfluss merklich ansteigt.

### Diagramm 2 (zu Messung 5.2)

Auftragen des Verlaufs: Widerstand  $R$  gegen Temperatur  $\vartheta$ . (Bei den Ge-Proben ist im hier möglichen Temperaturbereich nur das eigenleitende Verhalten zu beobachten.)

Skizzieren Sie zum Vergleich in das Diagramm den berechneten Verlauf  $R$  gegen  $\vartheta$  für eine Probe aus Kupfer, die bei 20°C den Widerstand 100  $\Omega$  hat.

Für Kupfer ist tabelliert:

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| spezifischer Widerstand bei 20°C      | $\rho_{20} = 0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ |
| Temperaturkoeffizient des Widerstands | $\alpha = 3,95 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$      |

$$\rho(\vartheta) = \rho_{20}(1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ \text{C})) \quad (4)$$

Wie lang ist ein Cu-Draht von 100  $\Omega$  mit dem Querschnitt 0,75 mm<sup>2</sup> ?

### Diagramm 3 (zu Messung 5.2)

Auftragen des Verlaufs: spezif. Leitfähigkeit  $\kappa$  gegen Temperatur  $T$ .

### Diagramm 4 (zu Messung 5.2)

Auftragen des Verlaufs: Logarithmus der spezif. Leitfähigkeit  $\log \kappa$  gegen reziproke absolute Temperatur  $1/T$  für die aufsteigende und absteigende Messung. Dazu verwendet man am besten einfach logarithmisches Papier mit der erforderlichen Anzahl von Dekaden auf der log-Skala.

In diesem Diagramm wird in dem geradlinigen Bereich, der den eigenleitenden Zustand (Bereich I) anzeigt, eine ausgleichende Gerade eingezeichnet. Die Steigung dieser Ausgleichsgerade wird bestimmt und daraus der Bandabstand  $E_g$  ermittelt. Dazu wird folgender Ansatz gemacht:

Wegen  $\kappa = e \cdot n \cdot \mu$  mit  $\mu \approx \text{konst.}$  und  $n(T) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right)$

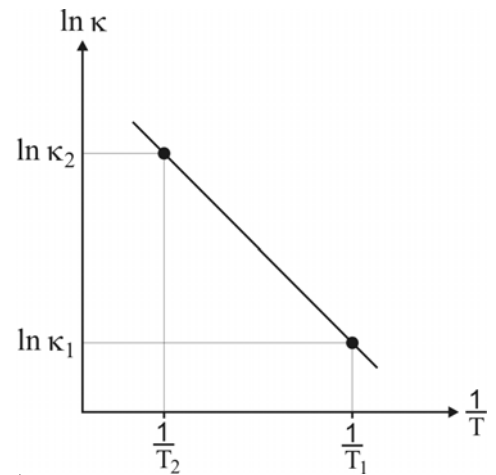
(Gl.3 und Gl. 1) wird die Gerade beschrieben durch

$$\kappa(T) = \kappa_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (5)$$

Für einen Punkt mit  $\kappa_1, T_1$  gilt

$$\kappa_1 = \kappa_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T_1}\right) \quad (6)$$

analog für einen Punkt mit  $\kappa_2, T_2$ .



Die beiden Gleichungen (6) werden dividiert und das Ergebnis logarithmiert:

$$\ln \kappa_1 - \ln \kappa_2 = \ln \frac{\kappa_1}{\kappa_2} = -\frac{E_g}{2 \cdot k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (7)$$

das wird umgestellt zu  $E_g = 2 \cdot k \left[ \frac{\ln(\frac{\kappa_1}{\kappa_2})}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \right]$  (8)

Die Rechnung liefert als Ergebnis den Bandabstand  $E_g$  in der Einheit  $J$ , anschließend ist auf die dafür übliche Energieeinheit  $eV$  umzurechnen.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Tabellenwert in der Literatur.

Machen Sie eine Abschätzung der möglichen Ungenauigkeit für das Ergebnis:

Markieren Sie dazu für einen oder mehrere Punkte im Diagramm die Fehlerbalken; schätzen Sie die Steigungen für die möglichen Grenzgeraden ab und daraus die Ungenauigkeit für  $E_g$ .

Protokollvorschlag für Messung 5.2

| $\vartheta$<br>in $^{\circ}C$ | $T$<br>in $K$ | $1/T$<br>in $K^{-1}$ | $U$<br>in $V$ | $I$<br>in $mA$ | $R$<br>in $\Omega$ | $\kappa$<br>in $(\Omega m)^{-1}$ |
|-------------------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------|--------------------|----------------------------------|
|                               |               |                      |               |                |                    |                                  |

**Literatur:**

- Müller: *Grundlagen der Halbleiter-Elektronik*
- Hering, Martin, Stohrer: *Physik für Ingenieure*
- Stöcker: *Taschenbuch der Physik*