

Im Versuch wird der elektrische Widerstand eines Halbleiterstücks aus Germanium in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Mit höherer Temperatur werden gemäß Gleichung (1) mehr Elektronen in das Leitungsband angeregt und vergrößern so den Stromtransport. Aus dem gemessenen Verlauf lässt sich der Bandabstand E_g zwischen Valenzband und Leitungsband bestimmen.

1. Theoretische Grundlagen

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

Bei zunehmender Temperatur treten Gitterschwingungen auf. Die Schwingungsenergie beträgt $\frac{2}{3}k \cdot T$ pro Atom und ist statistisch über die Atome verteilt. So wird bei einigen Atomen die Schwingungsenergie so groß, dass dort die Bindungen zu den Nachbaratomen aufbrechen.

Das vorher eine Valenzbindung ausübende Elektron ist damit quasifrei 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 mehr und mehr leitfähig, es ist eigenleitend.

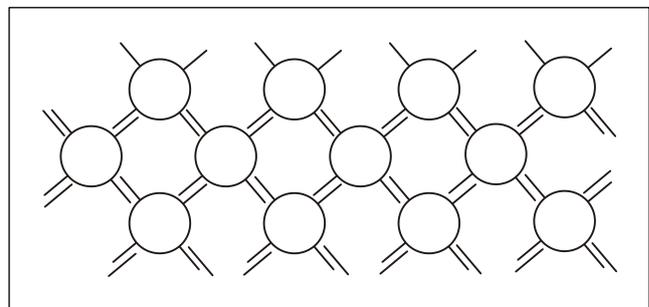
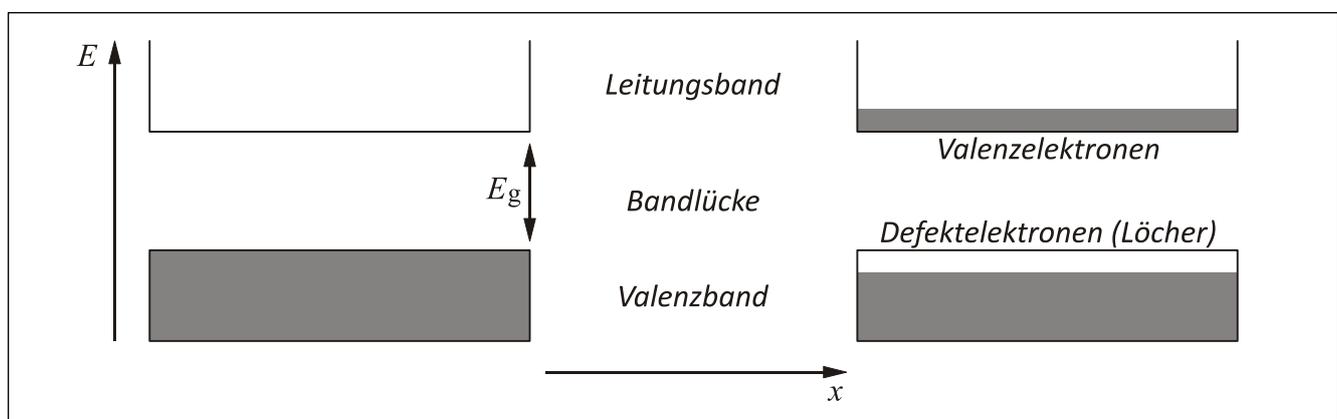


Bild 1: Darstellung kovalenter Elektronenpaarbindungen

Im Energiebänderschema oder Bändermodell der Halbleiterphysik werden die Elektronen nach ihrer Energie klassifiziert. Elektronen in Valenzbindungen besetzen das energetisch tiefere Valenzband. Die quasifreien Elektronen, die nicht mehr an der Bindung teilhaben, besetzen Zustände im energetisch höher liegenden Leitungsband.



a) bei sehr tiefer Temperatur

b) bei höherer Temperatur

Bild 2: Elektronenenergie im Halbleiter

Hinweis:

In der Quantenmechanik wird gezeigt, dass wegen des Pauli-Prinzips die im Einzelatom scharfen Energiezustände aufsplitten müssen; die Kristallelektronen besetzen daher gewisse Energiebereiche, sog. Energiebänder, die voneinander durch eine „verbotene Zone“, den Bandabstand oder die sogenannte Gap-Energie E_g , getrennt sind.

In dieser Bandlücke, auch „verbotenes Band“ genannt, gibt es keine von Elektronen besetzbare Energiezustände. Die Wahrscheinlichkeit zur thermischen Anregung und damit die Konzentration n quasi-freier Elektronen im Leitungsband wird beschrieben durch eine exponentielle Funktion

$$n(T) = n_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2k \cdot T}} \quad (1)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$: Boltzmann-Konstante

T : absolute Temperatur

1.1 Elektrische Leitfähigkeit

Im ohmschen Gesetz für den Stromtransport in Metallen ist der elektrische Widerstand R eine vom Material und der Probenform (Länge l ; Querschnittsfläche A) abhängige Größe:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \text{ oder } R = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A} \quad (2)$$

Die materialabhängige Größe $\kappa = 1/\rho$ heißt spezifische elektrische Leitfähigkeit, sie ergibt sich zu

$$\kappa = q \cdot n \cdot \mu. \quad (3)$$

q : Ladung ($q = -e$ für Elektronen; $q = +e$ für Löcher)

n : Ladungsträgerkonzentration, Konzentration freier Elektronen

μ : Beweglichkeit der Ladungsträger

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

In Metallen ist $n = \text{konstant}$ und in keiner Weise temperaturabhängig: jedes z-wertige Metallatom stellt z Valenzelektronen als Leitungselektronen bereit. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes ist bei Metallen von der Ladungsträgerbeweglichkeit bestimmt, die auf Grund der Photonenanregung mit zunehmender Temperatur abnimmt. In Halbleitern ändert sich n mit der Temperatur wegen Gl. (1) sehr stark, was zu einem drastischen Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit führt.

1.2 Halbleiter im eigenleitenden und dotierten Zustand

Für einen praktisch anwendbaren Transistor oder integrierten Schaltkreis 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, so genannte Defektelektronen oder Löcher, vorhanden, die zum Stromtransport zur Verfügung stehen.

Der Temperaturgang der Elektronenkonzentration wird im undotierten, eigenleitenden Zustand durch die Exponentialfunktion Gleichung (1) beschrieben:

$$n \sim e^{-\frac{E_g}{2k \cdot T}}$$

Im dotierten Zustand ist die Elektronenkonzentration n bzw. die Löcherkonzentration p praktisch konstant, weil die Dotierungskonzentration meist um mehr als vier Größenordnungen höher liegt als die Ladungsträgerkonzentration bei Zimmertemperatur infolge der Eigenleitung.

Wird der Halbleiter jedoch stark erwärmt, so werden zunehmend Ladungsträger ins Leitungsband angeregt, bis schließlich die thermisch bedingte Konzentration die Dotierungskonzentration wieder überwiegt: die horizontale Gerade für n mündet in den exponentiellen Verlauf der Eigenleitung (**Bild 3**).

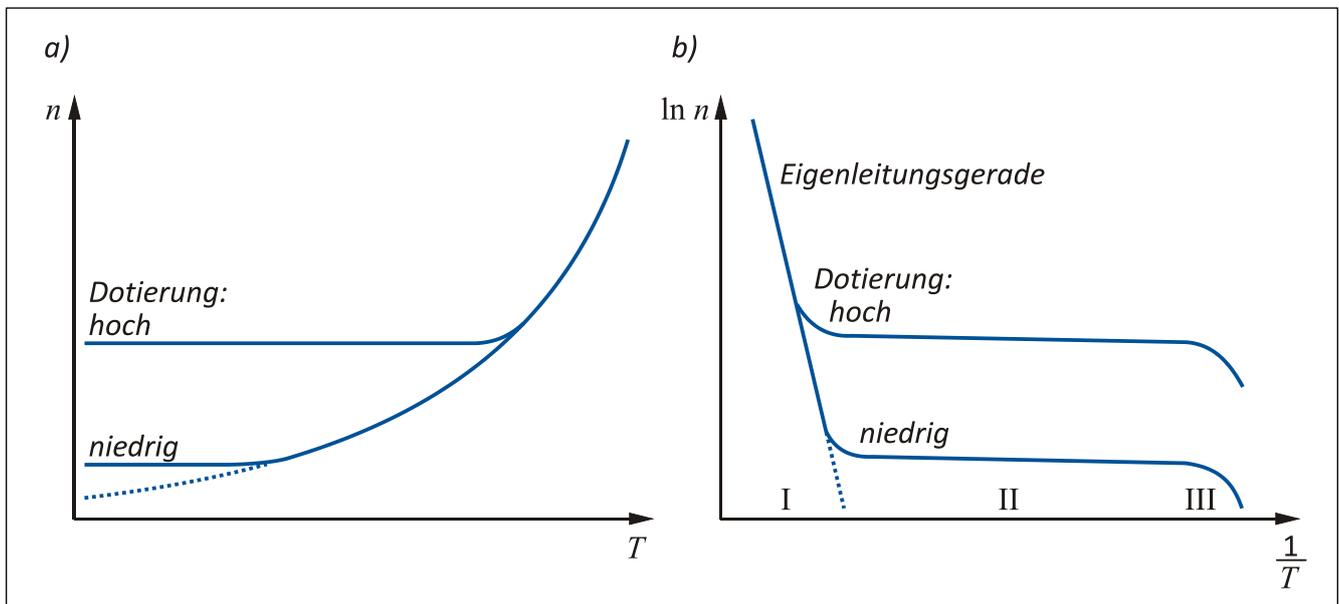


Bild 3: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs

Meist wird der Temperaturgang nicht als $n(T)$, sondern in der Form $\ln(n)$ in Abhängigkeit von T^{-1} aufgetragen. Dabei erscheint der exponentielle Verlauf bei Eigenleitung (*Bereich I*) als fallende Gerade, deren Steigung durch $E_g/2k$ bestimmt ist. Bei Störstellenleitung (*Bereich II*) gilt $n = \text{konst.}$; 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.

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Was verstehen Sie unter Elektronen- bzw. Löcherleitung?

Aufgabe 2: Eine Germanium-Probe mit den Abmessungen ($l \times b \times d$) $(20 \times 10 \times 1) \text{ mm}^3$ wird bei konstantem Probenstrom von $I = 5 \text{ mA}$ auf eine Temperatur von $\vartheta_{\text{max}} = 150 \text{ °C}$ erwärmt. Die Probenspannung U wird dann während der Abkühlungsphase alle 20 K gemessen.

Berechnen Sie zunächst den ohmschen Widerstand R und den elektrischen Leitwert κ für jeden gemessenen Spannungswert U . Ermitteln Sie durch Bestimmen des Anstieges die Steigung aus dem funktionellen Zusammenhang $\kappa = f(T^{-1})$ und berechnen Sie daraus den Bandabstand (*Gap-Energie*) E_g .

Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$	150	130	110	90	70
Probenspannung U in V	0,11	0,17	0,28	0,48	0,91

(Boltzmann-Konstante: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; Elementarladung: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Die Germanium-Probe mit den Abmessungen ($l \times b \times d$) $(20 \times 10 \times 1) \text{ mm}^3$ ist auf einer Platine befestigt, die auch die benötigten Kontakte trägt. Auf der Rückseite der Platine befindet sich eine Heizwendel. Diese Platine ist in ein Messmodul eingesteckt, mit dem über ein Display der Probenstrom oder die Probentemperatur (*umschaltbar über einen Taster*) angezeigt werden kann.

Die Stromversorgung des Messmoduls geschieht über ein Netzgerät **12V/35VA AC**. Zur Messung der Probenspannung wird ein Spannungsmessgerät (DC) benötigt, für das am Messmodul Ausgangsbuchsen vorhanden sind.

2.2.2 Versuchshinweise

Folgende Schaltung ist am Praktikumsplatz aufgebaut und vor der Inbetriebnahme des Experimentes zu überprüfen:

- das Messmodul mit eingesteckter Platine,
- die Anschlüsse des Stromversorgungsgerätes zur Versorgung des Messmoduls,
- die Anschlüsse des Spannungsmessgerätes zur Messung der Probenspannung.

Aufgabe 1: Überprüfung der Gültigkeit des ohmschen Gesetzes an einer Halbleiterprobe aus Germanium bei Raumtemperatur

- Erhöhen Sie bei Raumtemperatur die Stromstärke (**ohne Heizung**) durch die Germaniumprobe von $(0 \dots 20) \text{ mA}$ in **2mA-Schritten**.
- Halten Sie den Stromwert jeweils **mindestens 30 s** lang konstant
- Lesen Sie erst danach die Spannung und die Temperatur an der Probe ab.

Aufgabe 2: Bestimmung des elektrischen Widerstandes (*Strom- und Spannungsmessung*) in Abhängigkeit von der Temperatur

- Stellen Sie an der Probe eine Stromstärke von **3 mA** ein.
- Zum Aufheizen der Probe stellen Sie am Messmodul die Displayanzeige durch Betätigung des Tasters auf „Temperatur“ um.
- Schalten Sie die Heizung mit dem Taster an der Rückseite des Messmoduls an und nach dem Erreichen der Endtemperatur von **ca. 170°C** wieder ab.
- Messen Sie die Probenspannung U_p des Abkühlvorganges in einer Schrittweite von $\Delta T = 10\text{K}$.
- Nach Erreichen der Ausgangstemperatur stellen Sie an der Probe eine Stromstärke von **5 mA** ein und wiederholen Sie den gesamten Messvorgang (*Heizen und Abkühlen*).

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Überprüfung der Gültigkeit des ohmschen Gesetzes an einer Halbleiterprobe aus Germanium bei Raumtemperatur

- Stellen Sie in einem Diagramm die Funktion $U = f(I)$ (bei Raumtemperatur ϑ_{RT}) graphisch dar.
- Zeichnen Sie die Fehlerbalken ein und tragen Sie die jeweilige Temperatur neben den Messpunkten auf.
- Interpretieren Sie das Ergebnis.

Aufgabe 2: Bestimmung des elektrischen Widerstandes (*Strom- und Spannungsmessung*) in Abhängigkeit von der Temperatur

- Berechnen Sie den elektrischen Widerstand R und daraus die spezifische Leitfähigkeit κ .
- Verwenden Sie für die folgenden graphischen Darstellungen die **Aufheizkurven**.
- Stellen Sie in einem Diagramm die Funktionen $R = f(\vartheta)$ für (**3** und **5**)mA graphisch dar.
- Zeichnen Sie die Regressionsgeraden für den linearen Bereich (*Eigenleitung*) mit ein und bestimmen Sie daraus die Funktionsgleichungen.
- Berechnen Sie die Länge eines Kupferdrahtes, wenn dieser einen Widerstand von $R = 100 \Omega$ bei einer Temperatur von $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und einen Querschnitt von $A = 0,75 \text{ mm}^2$ hat.

Tabellendaten Kupfer:

$$\begin{aligned} \text{spez. Widerstand bei } 20^\circ\text{C: } \rho_{20} &= 0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1} \\ \text{Temperaturkoeffizient: } \alpha &= 3,95 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

- Ermitteln Sie den ohmschen Widerstand des gegebenen Drahtes bei einer Temperatur $\vartheta = 150^\circ\text{C}$. Beachten Sie dabei folgende Beziehung

$$R_{\vartheta} = R_{(20^\circ\text{C})} \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20^\circ\text{C})).$$

- Zeichnen Sie in das Diagramm die Widerstands-Temperatur-Kennlinie des Kupferdrahtes mit ein und bestimmen Sie ebenfalls die Funktionsgleichung.
- Geben Sie die Schnittpunkte zwischen den Anstiegen der Germaniumprobe und dem Anstieg des Widerstandsdrahtes an.

- Stellen Sie in einem Diagramm die Funktionen $\kappa = f(T)$ für (3 und 5) mA graphisch dar und tragen Sie den Verlauf der spezifische Leitfähigkeit κ zur absoluten Temperatur T auf.
- Stellen Sie nur für die 5 mA-Werte in einem weiteren Diagramm auf halblogarithmischem Papier die Funktion $\kappa = f(T^{-1})$ graphisch dar ($\kappa = \text{logarithmisch}$, $T^{-1} = \text{linear}$).
- Stellen Sie fest, in welchem Temperaturbereich „Störstellenleitung“ oder „Eigenleitung“ auftritt, in dem Sie in den geradlinigen Bereich (eigenleitender Zustand) eine Ausgleichsgerade einzeichnen.
- Bestimmen Sie den Exponenten aus dem Anstieg dieser Geraden durch Erstellen eines Anstiegsdreiecks und ermitteln Sie daraus den Bandabstand E_g . Vergleichen Sie diesen mit dem Tabellenwert (Tabellenwert für Bandabstand „Gap-Energie“: $E_g = 0,66 \text{ eV}$).

3. Ergänzung

3.1 Bestimmung des Bandabstand E_g

Verwenden Sie dazu den Zusammenhang

$$\kappa = q \cdot n \cdot \mu \quad \text{mit } \mu \approx \text{konst. und}$$

$$n(T) = n_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2k \cdot T}} .$$

Es ergibt sich daraus die Gleichung

$$\kappa(T) = \kappa_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2k \cdot T}} .$$