
Eigenleitung von Germanium

Fortgeschrittenen Praktikum I

Zusammenfassung

In diesem Versuch wird an einem undotierten Halbleiter die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Im Gegensatz zu einem metallischen Leiter oder einem stark dotierten Halbleiter, bei dem die Störstellenleitung dominiert, beobachtet man bei einem intrinsischen oder schwach dotierten Halbleiter mit steigender Temperatur einen raschen Anstieg der Leitfähigkeit, verursacht durch eine wachsende Konzentration thermisch erzeugter Elektronen und Löcher (Eigenleitung).

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
2	Experiment	4
2.1	Material	4
2.2	Versuchsdurchführung	4
2.3	Aufgaben	5
	Literaturverzeichnis	5

1 Theoretische Grundlagen

Allgemein gilt für die elektrische Leitung in homogenen Stoffen (Metalle, Halbleiter, Elektrolyte) das Ohmsche Gesetz

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{mit} \quad R = \text{const.}, \quad (1)$$

wobei I die Stromstärke und U die Spannung ist. Der Widerstand R ist bestimmt durch

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{A \cdot \sigma} \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

mit der Länge l , der Fläche A , dem spezifischen Widerstand ρ und der Leitfähigkeit σ . Die Materialkonstante 'Leitfähigkeit' ist durch die Beziehung

$$\sigma = e \cdot \mu \cdot n, \quad (3)$$

mit den atomistischen Größen Ladung e , Beweglichkeit μ und Ladungsträgerkonzentration n verknüpft. Dabei wird die Beweglichkeit als Quotient von mittlerer (Drift) Geschwindigkeit \bar{v}_D zur wirkenden Feldstärke E beschrieben

$$\sigma = \frac{\bar{v}_D}{E}. \quad (4)$$

Die Stoffklassen Metalle, Halbleiter und Isolatoren unterscheiden sich deutlich in ihrer Leitfähigkeit und zeigen eine charakteristische Temperaturabhängigkeit $\sigma(T)$ bzw. $R(T)$. Mit Erhöhung der Temperatur T steigt i.a. bei Metallen der Widerstand R schwach an (schwache Abnahme der Leitfähigkeit), während bei Halbleitern mit steigender Temperatur der Widerstand stark abnimmt (starker Anstieg der Leitfähigkeit).

Der Ladungsträgertransport in kristallinen Festkörpern - das sind Metalle, klassische Halbleiter und eine Reihe von Isolatoren - lässt sich mit Hilfe des Bändermodells beschreiben. Die Besetzung der Energieniveaus in den Bändern mit Elektronen erfolgt mit steigender Energie nach dem Prinzip der Minimierung der Gesamtenergie. Das höchste vollbesetzte Band ist das **Valenzband**. Elektrische Leitfähigkeit erfordert frei bewegliche Ladungsträger, d.h. beim Ladungstransport muss das Elektron in seiner unmittelbaren (energetischen) Nachbarschaft ein unbesetztes Energieniveau finden. In vollbesetzten Energiebändern ist deshalb kein Ladungstransport möglich.

Auf das Valenzband folgt ein nicht vollbesetztes Band, das **Leitungsband**. Dazwischen kann eine verbotene Zone sein, in der keine Energieniveaus für Elektronen existieren. Das Bändermodell erlaubt Aussagen über die Anzahl der zur Verfügung stehenden frei beweglichen Ladungsträger und deren Temperaturabhängigkeit.

Die **Beweglichkeit** hängt von den Wechselwirkungen der Ladungsträger mit Störungen des idealen Gitters ab. Das sind vor allem die Schwingungen der Gitterbausteine (Atomrümpfe) um ihre Ruhelage infolge thermischer Energie (Phononen). Aber auch Störungen im Gitteraufbau, wie Fremdatome, Korngrenzen, Mischkristall- und Legierungsstrukturen verursachen eine Verminderung

der Beweglichkeit. Normalerweise dominieren im Bereich der Raumtemperatur die thermischen Gitterschwingungen, die Beweglichkeit hängt linear von $1/T$ ab.

Kennzeichen der Halbleiter sind ein vollbesetztes Valenzband und ein bei tiefen Temperaturen völlig leeres Leitungsband, dazwischen liegt die Energielücke E_g (Bandgap). Bei sehr tiefen Temperaturen sind Halbleiter daher Isolatoren. Bei entsprechend hoher Temperatur reicht die thermische Energie der Valenzelektronen aus, um die Energielücke zu überwinden - es gibt nun gleichzeitig frei bewegliche Elektronen im Leitungsband und ebenso viele frei bewegliche Löcher (Defektelektronen - Löcher mit positiver Elementarladung) im Valenzband. Erfolgt der Ladungsträgertransport auf diese Weise, so spricht man von **Eigenleitung**.

Sind im Kristallgitter Fremdatome (Störstellen) eingebaut, die einer Nachbargruppe im Periodensystem angehören, dann ergeben sich Energieniveaus, die in der verbotenen Zone entweder nahe am Leitungs- bzw. nahe am Valenzband liegen. Fremdatome mit Elektronenüberschuß (gegenüber dem Wirtatom) haben Energieniveaus nahe dem Leitungsband und können daher sehr leicht Elektronen ins Leitungsband liefern, man bezeichnet sie als Donatoren. Fremdatome mit Elektronenmangel haben Energieniveaus nahe dem Valenzband und können leicht Elektronen aus dem Valenzband einfangen, man nennt sie Akzeptoren. Der zugehörige Leitungsmechanismus wird **Störstellenleitung** genannt. Eigen- und Störstellenleitung wirken im Halbleiter immer gleichzeitig, praktisch dominiert in den meisten Fällen die Störstellenleitung.

Die Temperaturabhängigkeit des Halbleiterwiderstandes $R(T)$ bzw. $\sigma(T)$ wird im Gegensatz zu Metallen sowohl durch die Ladungsträgerkonzentration $n(T)$ als auch durch die Beweglichkeit $\mu(T)$ bestimmt. Da der Temperaturabhängigkeit $n(T)$ ein thermisch aktivierter Anregungsprozess zugrunde liegt, kann $n(T)$ durch folgendes Exponentialgesetz beschrieben werden

$$n(T) = n_0 \cdot e^{-E_A/kT}, \quad (5)$$

wobei n_0 eine materialabhängige Größe und k die Boltzmann-Konstante ist. Die wichtigste Größe ist die Aktivierungsenergie E_A (in solchen 'Arrheniusbeziehungen' steht immer die absolute Temperatur T in Kelvin). Bei der Störstellenleitung ist die Aktivierungsenergie E_A die Energiedifferenz von der Störstelle (in der verbotenen Zone) zum entsprechenden Band, bei der Eigenleitung gilt $E_A = 1/2E_g$. Die Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit wird meist durch Gitterschwingungen bestimmt. Dieser Temperatureinfluß ist bei Halbleitern sehr viel geringer als der Temperatureinfluß der Ladungsträgerkonzentration, so dass die $\sigma(T)$ - bzw. $R(T)$ - Abhängigkeit in der Regel durch $n(T)$ dominiert wird. Unter dieser Bedingung gilt (siehe Gleichungen 2, 3 und 6)

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot e^{-E_A/kT} \quad \text{mit} \quad R(T) = R_0 \cdot e^{E_A/kT}. \quad (6)$$

Die Auftragung $\ln(R)$ über $1/T$ liefert eine Gerade, aus deren Anstieg die Aktivierungsenergie E_A ermittelt wird. Der erhaltene Wert liefert in guter Näherung die Störstellenlage in der Bandlücke bzw. den halben Bandabstand

$1/2E_g$ (Eigenleitung). Bei der Störstellenleitung tritt bei bestimmten Temperaturen auch der Fall auf, dass alle Donatoren bzw. Akzeptoren ihre Ladungsträger abgegeben bzw. aufgenommen haben (entspricht der Sättigung der Störstellenleitung). Dann ist $n(T)$ temperaturunabhängig, vorausgesetzt, die Eigenleitung liefert noch keinen merklichen Beitrag. Die $\sigma(T)$ - bzw. $R(T)$ -Abhängigkeit ist dann der von Metallen vergleichbar und kann mit einem (linearen) Temperaturkoeffizienten beschrieben werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Halbleitereigenschaften kann u.a. in folgenden Referenzen nachgelesen werden [1, 2, 3, 4, 5].

2 Experiment

2.1 Material

Zur Verfügung stehen: Eigenleitungs-Trägerplatine (undotiertes Germanium), Spannungsquelle und Hall-Effekt-Modul von Phywe, sowie zwei Digitalmultimeter zur Messung von Strömen und Spannungen.

Kristallmaterial	Germanium, undotiert
Probenmasse	$(20 \times 10 \times 1) \text{ mm}^3$
Spez. Widerstand	$> 15 \Omega \text{ cm}$
max. Stromstärke	30 mA
Thermoelement	Pt100

2.2 Versuchsdurchführung

Bitte die Platine sorgfältig behandeln. Ge-Kristalle sind spröde und bruchempfindlich, ein Bruch des Kristalls durch Verbiegen macht die Platine unbrauchbar!

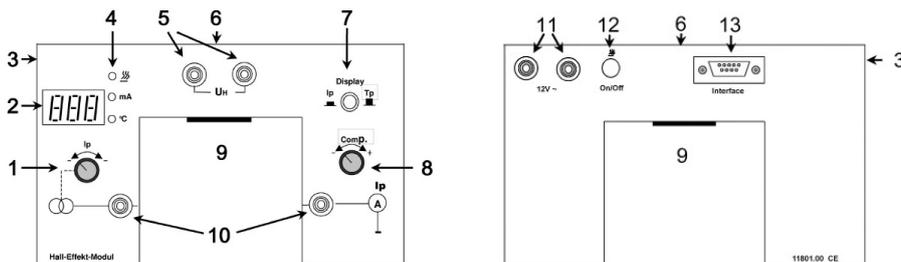


Abbildung 1: Hall-Effekt-Modul zur Messung der Eigenleitung von undotiertem Germanium.

Zur Bestimmung der Bandlücke von Germanium wird die Leitfähigkeit der Probe bei einem konstanten Probenstrom von 5 mA als Funktion der Proben-temperatur gemessen. Größere Probenströme sollten vermieden werden, da sie zu einer Eigenerwärmung führen und sich verfälschend auf die Messwerte

auswirken. Der Spannungsabfall an der Probe wird über ein Digitalmultimeter (angeschlossen an das Buchsenpaar (10)) bestimmt. Bevor der stabilisierte Probenstrom mit Hilfe des Drehknopfes (1) eingestellt werden kann, ist durch Betätigung des Druckschalters (7) das LED-Display (2) auf die mA-Anzeige zu schalten (die 'mA'-Diode (4) muss leuchten).

Die Probenheizung wird mit dem rückseitigen Druckschalter (12) eingeschaltet. Eine aktive Heizung wird durch die entsprechende Kontrolldiode (4) angezeigt. Nach Erreichen der Maximaltemperatur von $T = 170\text{ °C}$ schaltet sich die Heizung automatisch ab und die Kontrolldiode (4) erlischt.

2.3 Aufgaben

1. Messung der Spannung bei abfallender Temperatur und konstantem Strom. Der Germanium Kristall wird auf eine Temperatur von 170 °C aufgeheizt. Während der Abkühlphase werden Strom-Spannungs-Daten in Abhängigkeit der Temperatur aufgenommen. *Warnung: Die Trägerplatine sollte nicht berührt werden!*
2. Graphische Darstellung von $R(T)$ über T und dem dazu gehörigen Arrhenius-Graphen. Fehlerbalken nicht vergessen!
3. Bestimmung der Bandlücke E_g , Vergleich mit dem Literaturwert [6, 7] und Diskussion möglicher Fehlerquellen.

Assistent: Sebastian Scherb, Raum 3.02, sebastian.scherb@unibas.ch

Literatur

- [1] L. Bergmann, C. Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik 6, Festkörper, Verlag de Gruyter, 2005; ISBN: 3-11-017485-5.
- [2] Ch. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik. R. Oldenbourg Verlag München, 2005; ISBN: 3-486-57723-9.
- [3] D. Meschede, Gerthsen Physik, Springer Verlag, 2004; ISBN: 3-540-02622-3.
- [4] Neil W. Ashcroft, N. D. Mermin: Festkörperphysik 2. Auflage. R. Oldenbourg Verlag München, 2005; ISBN: 3-486-57720-4.
- [5] H. Ibach, H. Lüth: Festkörperphysik 6. Auflage. Springer Verlag, Berlin 2002; ISBN: 3-540-42738-4.
- [6] Eigenschaften von Germanium: Landolt-Börnstein, Band III/17a, Semiconductors: Physics of Group IV Elements and III-V Compounds; Band III/22a, Semiconductors: Intrinsic Properties of Group IV Elements and III-V Compounds.
- [7] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>; 20.Feb. 2006.