

Physik-Praktikum: TEM

Einleitung

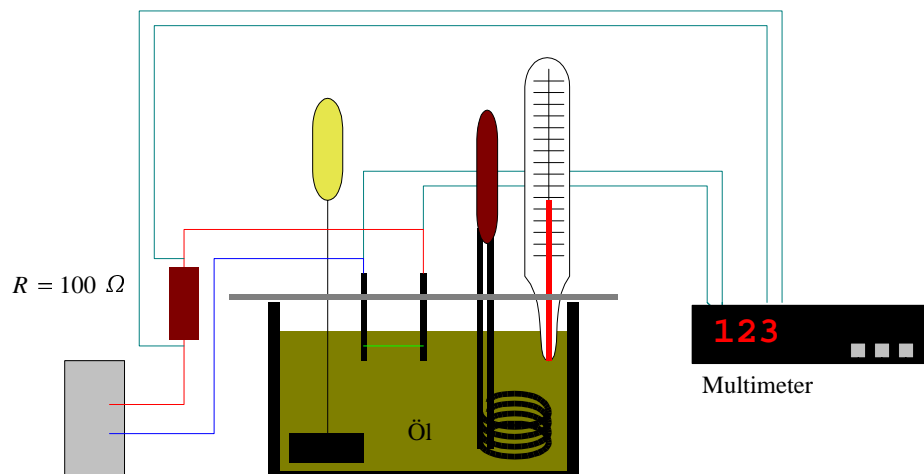
Der Unterschied zwischen Metall, Halbleiter und Isolator zeigt sich nicht nur durch ihren unterschiedlichen elektrischen Widerstand, sondern auch durch das temperaturabhängige Verhalten dieses Widerstandes – dieses ist nämlich bei Metall und Halbleiter genau entgegengesetzt. Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich aber mit einer entsprechenden Modellvorstellung des Atombaus (Bohrsches Atommodell, vereinfacht als Bändermodell) gut begründen (siehe auch Frage 3):

Metalle können, weil sie bei jeder Temperatur ein elektronenbesetztes Leitungsband besitzen, immer Strom leiten; die Elektronen, die hier die Ladungsträger sind, werden bei höheren Temperaturen durch die größere Brownsche Bewegung der Atome behindert.

Halbleiter dagegen bauen bei zunehmender Temperatur ihr Leitungsband erst auf (je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen sind im Leitungsband und stehen zum Ladungstransport zur Verfügung), dieser Effekt ist deutlich stärker als die steigende Behinderung der Ladungsträger durch die Brownsche Bewegung.

Versuchsaufbau

In einem Topf befindet sich Öl, das mit Hilfe eines Tauchsieders geheizt werden kann. Mit einem Rührer kann das Öl durchmischt werden, und mit zwei Thermometern wird die Temperatur gemessen. (Das eine Thermometer ist ein Kontaktthermometer, das als Thermostat für den Tauchsieder fungiert: ist die Quecksilbersäule soweit gestiegen, dass sie einen höhenverstellbaren Faden berührt, wird über ein Relais die Heizung abgeschaltet.) In das Ölbad eingetaucht sind drei Drähte (zwei aus Metall (Platin und Konstantan) und einer aus einem Halbleiter (Germanium)), durch die Strom geleitet wird, und deren Temperatur durch das umgebende Öl exakt geregelt werden kann. Mit einem Digitalmultimeter kann der Widerstand der Drähte entweder direkt oder mittels der 4-Kontakt-Methode gemessen werden (dazu ist ein 100-Ohm-Widerstand in Reihe geschaltet). Ein Umschalter zwischen Drähten und Multimeter sorgt dafür, dass man bequem die Widerstandsmessung durchführen kann, ohne umstecken zu müssen.



Durchführung

Beginnend mit der Zimmertemperatur wird jeweils der Widerstand der beiden Metalldrähte direkt mit dem Multimeter gemessen, und am Halbleiterdraht und am 100-Ohm-Widerstand jeweils der Spannungsabfall zur Widerstandsbestimmung mit der 4-Kontakt-Methode mit dem Multimeter gemessen. Anschließend wird die Temperatur jeweils um 20 °C (bis 120 °C) erhöht (unter dauerndem Rühren, damit das Öl gleichmäßiger wärmt wird) und die Messung wiederholt.

Statt der in der Anleitung geforderten Maximaltemperatur von 150 °C sollte nur bis 120 °C gemessen

werden, weil nahe 150 °C die Lötstellen (aus Indium, um den Kontaktwiderstand zu minimieren) zu schmelzen beginnen. Außerdem ergaben sich bei unseren Messungen falsche Werte, die auf eine unzuverlässige Hardware zurückzuführen sind, ein bekanntes Problem an unserem Messplatz. Daher arbeiten wir in dieser Ausarbeitung mit den Messwerten der Nachbargruppe.

Ergebnisse

$$R_v = 100 \Omega$$

Temperatur [°C] ±0,5 °C	R_1 [Ω] ±0,1 Ω	R_2 [Ω] ±0,1 Ω	U_x [V] ±1 mV	U_v [V] ±1 mV	R_x [Ω] $R_x = \frac{U_x}{U_v} R_v$
23	108,7	99,6	0,705	0,812	86,8
40	113,0	98,4	0,421	1,068	39,4
60	120,6	99,7	0,229	1,284	18,3
80	125,8	99,3	0,128	1,421	9,01
90	129,3	99,5	0,096	1,469	6,53
100	134,2	99,6	0,062	1,511	4,10
110	136,4	99,5	0,051	1,530	3,30
120	142,0	99,7	0,041	1,543	2,65
130	146,0	99,5	0,0294 ±0,1 mV	1,564	1,88

Aus dem Diagramm ergibt sich, dass es sich bei R_2 um den Konstantendraht handeln muss, weil bei dieser Legierung der Widerstand nahezu temperaturunabhängig ist: der Graph ist eine waagerechte Gerade. Der Graph von R_1 dagegen steigt linear, hier handelt es sich um Platin. Dass R_x der Halbleiter ist, ist bekannt.

Temperaturabhängigkeit bei Metallen

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands kann bei Metallen mit folgender Formel beschrieben werden:

$$(1) R(T) = R_0 \cdot (1 + \beta T)$$

Die Geradengleichung der Ausgleichsgerade lautet (2) $y(x) = y_0 + m x$, die Parameter werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$y_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum y_i x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}; \quad m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2};$$

Es ergibt sich für die Ausgleichsgerade (wir berechneten die Werte mit einem Tabellenkalkulationsprogramm):

Platin:

$$m = 0,35 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}; \quad y_0 = 99,46 \Omega;$$

Standardabweichung: $\sigma = 0,02 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$; Messunsicherheit: $u = 0,36 \cdot 0,02 = 0,0072 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$;

Konstantan:

Standardabweichung: $\sigma = 0,4 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$; Messunsicherheit: $u = 0,36 \cdot 0,4 = 0,144 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$;

Beim Vergleich zwischen (1) und (2) ergibt sich:

$$y_0 = R_0, \quad m = R_0 \beta.$$

Also ist

$$\beta_{Pt} = \frac{m_{Pt}}{y_0} = (3,53 \pm 0,14) \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

für Platin (Messungenauigkeit aus Messunsicherheit der Steigung und Ableseungenauigkeit des Thermometers).

Da bei Konstantan die Steigung unserer Ausgleichsgerade exakt 0 ist, gibt es nach unserer Messung für Konstantan keine Temperaturabhängigkeit: $\beta_{Konstantan} = 0$.

Temperaturabhängigkeit bei Halbleitern

Trägt man den Logarithmus des Widerstandes des Germaniums über die reziproke absolute Temperatur an, ergibt sich eine Gerade:

$$(3) \quad y = \ln R(T) = m \cdot \frac{1}{T} + y_0; \quad m = 4362,0.$$

Daraus ergibt sich:

$$R(T) = e^{y_0} \cdot e^{\frac{m}{T}};$$

Esgilt für die elektrische Leitfähigkeit:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-E_g}{2 k_B T}};$$

Umgerechnet für den Widerstand:

$$R(T)^{-1} = R_0^{-1} \cdot e^{\frac{-E_g}{2 k_B T}}; \quad R(T) = R_0 \cdot e^{\frac{E_g}{2 k_B T}};$$

Logarithmiert man die Gleichung, so ergibt sich:

$$\ln R(T) = \ln R_0 + \frac{E_g}{2 k_B T};$$

Durch Vergleich mit (3) folgt:

$$m = \frac{E_g}{2 k_B}, \quad y_0 = \ln R_0;$$

$$\Rightarrow E_g = 2 k_B m = (0,76 \pm 0,03) \text{ e V}.$$

Dader Versuchsaufbau und die Messung identisch ist, wird derselbe Fehler von 4 % abgenommen.

Fragen

1. Wie ist der spezifische Widerstand eines Leiters definiert?

Der spezifische Widerstand eines Leiters ist der Quotient aus dem absoluten Widerstand, multipliziert mit der Querschnittsfläche, und der Länge des Leiters:

$$\varrho = \frac{R \cdot A}{l} \quad [\Omega \cdot \text{m}].$$

Der spezifische Widerstand ist material- und temperaturabhängig, er gibt den Widerstand unabhängig von den Dimensionen bzw. der (Querschnitts-)Form des Leiters an (der absolute Widerstand ist proportional zu der Länge und umgekehrt proportional zur Anzahl der parallel verfügbaren Ladungsträger, die wiederum zur Querschnittsfläche proportional sind).

2. Was versteht man unter der Beweglichkeit von Ladungsträgern?

Die Beweglichkeit der Ladungsträger ist der Quotient aus Driftgeschwindigkeit (Durchschnittsgeschwindigkeit (bezüglich Betrag und Richtung) der Ladungsträger) und angelegtem elektrischen Feld:

$$\mu = \frac{v_D}{E} .$$

Das elektrische Feld wird durch die angelegte Spannung an beiden Enden des Leiters hervorgerufen, es gilt also: $E = U / l$.

Man unterscheidet bei der Beweglichkeit zwischen positiven und negativen Ladungsträgern, es gibt also eine positive und eine negative Beweglichkeit.

3. Wie unterscheiden sich die Energiebänder von Halbleiter, Metall und Isolator bei $T = 0 \text{ K}$?

Bei Metall ist das Leitungsband bereits am absoluten Nullpunkt teilweise mit Elektronen besetzt, d.h. Metalle können auch am Nullpunkt Strom leiten. Bei Halbleitern und Isolatoren ist dagegen das Leitungsband leer, sie können keinen Strom leiten; der einzige Unterschied ist hier, dass bei Halbleitern wesentlich weniger Energie (d.h. Wärme) benötigt wird, um Elektronen in das Leitungsband zu heben und den Stoff somit leitfähig zu machen.

Die Valenzbänder sind bei allen Stoffen am Nullpunkt voll besetzt (ansonsten würde man sie als Leitungsband bezeichnen).

4. Warum bestimmt man den Widerstand des Halbleiters mit der 4-Kontakt-Methode? Wie funktioniert diese?

An den Verbindungsstellen zwischen Metall und Halbleiter treten Kontaktwiderstände auf, die eine direkte Widerstandsmessung verfälschen würden (sie addieren sich zum Widerstand des Halbleiters).

Daher leitet man über zwei äußere Kontakte Strom durch den Halbleiter und misst den Spannungsabfall zwischen zwei inneren Kontakten. Dies ist möglich, weil bei einer Spannungsmessung der Widerstand praktisch keine Rolle spielt (der Innenwiderstand eines idealen Voltmeters ist unendlich hoch, so dass kein Strom über das Voltmeter fließt; deshalb kann an den Kontaktwiderständen zwischen Halbleiter und Voltmeter keine Spannung abfallen und die Messung verfälschen).

Im Stromkreis muss außerdem ein zweiter ohmscher Referenzwiderstand (mit bekanntem, konstantem Widerstandswert) geschaltet sein, bei dem der Spannungsabfall ebenfalls gemessen wird. Das Verhältnis der Spannungsabfälle ist gleich dem Verhältnis der Widerstände, und zusammen mit dem bekannten Widerstand kann man den Widerstand des Messdrahtes berechnen:

$$R_{\text{mess}} = \frac{U_{\text{mess}}}{U_{\text{Referenz}}} \cdot R_{\text{Referenz}} .$$