



AUFGABEN

- Nachweis des Hall-Effektes in dotiertem Germanium.
- Messung der Hall-Spannung in Abhängigkeit von Strom und Magnetfeld bei Raumtemperatur.
- Bestimmung des Vorzeichens, der Dichte und der Beweglichkeit der Ladungsträger bei Raumtemperatur.
- Messung der Hall-Spannung in Abhängigkeit von der Probestemperatur.
- Bestimmung der Inversionstemperatur und Unterscheidung zwischen extrinsischer und intrinsischer Leitung bei p-dotiertem Germanium.

HINWEIS

Die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der verwendeten Germaniumkristalle wird in Experiment UE6020100 näher untersucht.

3

ZIEL

Untersuchung der Mechanismen der elektrischen Leitung in dotiertem Germanium mit dem Hall-Effekt.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Hall-Effekt tritt in stromleitenden Materialien auf, die sich in einem Magnetfeld B befinden. Das Vorzeichen der Hall-Spannung wechselt, je nachdem ob der gleiche Strom I durch positive oder negative Ladungsträger getragen wird. Ihr Betrag hängt von der Ladungsträgerdichte ab. Daher bietet der Hall-Effekt ein wichtiges Instrument zur Bestimmung der Mechanismen des Ladungstransportes in dotierten Halbleitern. Im Experiment werden dotierte Germaniumkristalle bei Temperaturen zwischen 300 K und 450 K untersucht, um die durch Dotierung ermöglichte elektrische Leitung und die durch thermische Aktivierung von Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband ermöglichte Eigenleitung zu unterscheiden.

BENÖTIGTE GERÄTE

Anzahl	Geräte	Art.-Nr.
1	Hall-Effekt, Grundgerät	1009934
1	n-dotiertes Germanium auf Leiterplatte	1009760
1	p-dotiertes Germanium auf Leiterplatte	1009810
1	Magnetfeldsensor ± 2000 mT	1009941
1	Spule D mit 600 Windungen	1000988
1	U-Kern	1000979
1	Paar Polschuhe und Spannbügel für Hall-Effekt	1009935
1	Transformator mit Gleichrichter 3/ 6/ 9/12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1003316 oder
1	Transformator mit Gleichrichter 3/ 6/ 9/12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1003315
1	DC-Netzgerät 0-20 V, 0-5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 oder
1	DC-Netzgerät 0-20 V, 0-5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Digital-Multimeter P3340	1002785
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 oder
1	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	Satz 15 Sicherheitsexperimentierkabel 75 cm	1002843
Zusätzlich empfohlen:		
1	3B NETlab™	1000544

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Der Hall-Effekt tritt in stromleitenden Materialien auf, die sich in einem Magnetfeld B befinden. Er hat seine Ursache in der Lorentz-Kraft, die die am elektrischen Strom I durch eine Materialprobe beteiligten Ladungsträger senkrecht zum Magnetfeld und zur Stromrichtung ablenkt. Die Ladungstrennung bewirkt ein elektrisches Feld E_H senkrecht zur Stromrichtung, das die Lorentz-Kraft kompensiert, und erzeugt eine Hall-Spannung U_H zwischen den Rändern der Probe. Das Vorzeichen der Hall-Spannung wechselt, je nachdem ob der gleiche Strom I durch positive oder negative Ladungsträger getragen wird. Ihr Betrag hängt von der Ladungsträgerdichte ab. Daher bietet der Hall-Effekt ein wichtiges Instrument zur Bestimmung der Mechanismen des Ladungstransportes in stromleitenden Materialien, das häufig zur Untersuchung von dotierten Halbleitern eingesetzt wird.

Im Experiment werden dotierte Germaniumkristalle bei Temperaturen zwischen 300 K und 450 K untersucht. Die Kristalle sind als flache Proben mit der Länge a , der Breite b und der Dicke d ausgeführt, durch die der Strom I in Längsrichtung fließt. Das Magnetfeld B durchdringt die Probe senkrecht zum Strom. Daraus resultiert die Hall-Spannung

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

mit dem Hall-Koeffizienten

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As: Elementarladung

Die Dichten n_n der Elektronen im Leitungsband, n_p der Defektelektronen im Valenzband, sowie die Beweglichkeiten μ_n der Elektronen und μ_p der Defektelektronen sind Materialgrößen und hängen von der Probestemperatur T ab.

Zusätzlich zur Hall-Spannung wird im Experiment der Spannungsabfall U in Längsrichtung der Probe gemessen, um die elektrische Leitfähigkeit

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

und die sogenannte Hall-Beweglichkeit

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

zu bestimmen.

Die Ladungsträgerdichten n_n und n_p sind durch die Dotierung, also durch Einbindung von Fremdatomen in den Kristall beeinflusst. Im Falle der p-Dotierung binden Akzeptoratome Elektronen aus dem Valenzband und verursachen so Löcher im Valenzband – die sogenannten Defektelektronen. Im Falle der n-Dotierung geben Donatoratome jeweils ein Elektron in das Leitungsband ab.

Die dotierten Kristalle sind elektrisch neutral, negative Ladungen und positive Ladungen gleichen sich also aus. Somit ist

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

n_A : Konzentration der Akzeptoren, n_D : Konzentration der Donatoren
Außerdem sind n_n und n_p durch ein Massenwirkungsgesetz gekoppelt, da sich im temperaturabhängigen Gleichgewicht pro Zeiteinheit gleich viele Elektron-Defektelektron-Paare bilden wie rekombinieren. Es gilt:

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n^2$$

n_i Ladungsträgerdichte bei reiner Eigenleitung
(siehe Experiment UE6020100)

Insgesamt ist daher

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

Bei Raumtemperatur sind die Konzentrationen n_A bzw. n_D deutlich größer als die Ladungsträgerdichte bei reiner Eigenleitung n_i . Daher ist

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \quad \mu_H = -\mu_n$$

bei n-Dotierung und 300 K

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_p$$

bei p-Dotierung und 300 K

Vorzeichen und Dichte der Ladungsträger lassen sich also unmittelbar aus dem Hall-Koeffizienten ablesen. Die Beweglichkeit der Ladungsträger entspricht der Hall-Beweglichkeit.

AUSWERTUNG

Da mit steigender Temperatur immer mehr Ladungsträger zum Stromtransport zur Verfügung stehen, nimmt die Hall-Spannung ab, bis sie den Wert Null erreicht.

Für p-dotiertes Germanium wechselt das Vorzeichen der Hall-Spannung, weil die mit zunehmender Eigenleitung den Einfluss der Elektronen dominiert, deren Beweglichkeit μ_n größer ist. Unterhalb der sogenannten Inversionstemperatur dominiert die durch Dotierung ermöglichte elektrische Leitung, oberhalb der Inversionstemperatur die Eigenleitung. Bei hohen Temperaturen sind der n-dotierte und der p-dotierte Kristall nicht mehr unterscheidbar, da

$$n_n = n_p = n_i, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeiten μ_n und μ_p macht sich im Hall-Koeffizienten nicht bemerkbar, da in beiden Fällen gilt: $\mu \sim T^{-3/2}$ (siehe auch Experiment UE6020100)

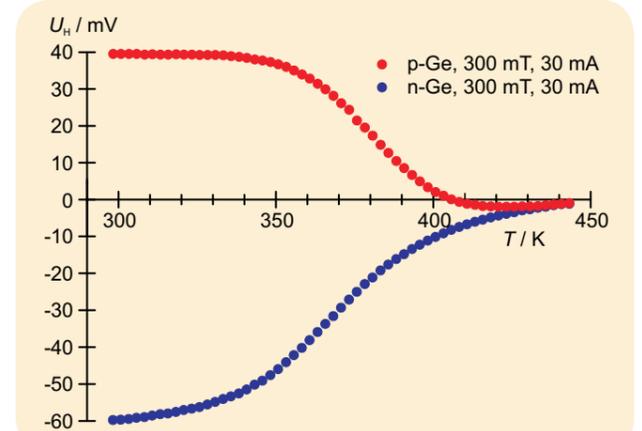


Abb. 1: Hall-Spannung in p- und n-dotiertem Germanium als Funktion der Temperatur T