



実験の手順

- ・不純物をドーピングされたゲルマニウム結晶を使ってホール効果を確認します。
- ・室温で電流や磁場を変化させた場合、ホール電圧の変化を測定します。
- ・室温における電荷の担体（キャリア）の符号と密度と移動度を測定します。
- ・ホール電圧と試料の温度との関係を測定します。
- ・p型半導体における真性伝導率と外因性伝導率の差を調べて、逆転温度を測定します。

注意

本実験に使用するのと同型のゲルマニウム結晶の電気伝導率の温度依存性は、セット番号UE6020100の実験で測定します。

応用実験

目的

ホール効果を使って、ドーピングされたゲルマニウムにおける電気伝導のメカニズムを調べる。

まとめ

ホール効果は、磁場 B 中に置かれた導電性物質内で生じる現象です。ホール電圧の符号は、電流 I を担う電荷担体の電荷の符号に依存します。さらにその値は、電荷担体の密度に依存します。したがってホール効果は、不純物をドーピングした半導体における電荷輸送のメカニズムを調べるための重要な方法になります。本実験では、不純物をドーピングしたゲルマニウム結晶を使って、300K ~ 450K の温度範囲で実験をすることにより、ドーピングによって可能となる外因性電気伝導率と、価電子帯から伝導帯への電子の熱励起によって可能となる真性電気伝導率との違いを確かめます。

必要機器

品番	品名	数量
U8487000	ホール効果実験セット	1
U8487030	N ドープ Ge 搭載プリント回路基板	1
U8487020	P ドープ Ge 搭載プリント回路基板	1
U8497430	変圧器コイル：D 型、600 巻	2
U8497215	U 字型鉄心：D 型	1
U8497205	ホール効果実験用磁極片セット	1
U138021	75cm プラグ付き安全リード線：15 本セット	1
U11300-115	3B NET/og™ (100V, 50/60Hz)	1
U11359	磁場センサー ± 2000 mT	1
U118091	デジタルマルチメーター・P3340	1

別途、ご用意ください

交流電源 12V/3A	1
直流電源 20V/5 A	1

基本原理

ホール効果は、電気伝導性を持つ物質を磁場 B 中に置いた場合に生じる現象です。この効果は、電流の担い手である電荷担体が試料中で移動する方向が、磁場と電流の双方に直交する方向へと曲がるローレンツ力が働くことに起因します。電荷担体である電子と正孔がこの効果により分離するために、電流と直交する方向への電場が発生しローレンツ力の効果を打ち消します。同時に試料の側端部で、ホール電圧 U_H が発生します。ホール電圧の符号は、電流の担体が負電荷を持つ電子であるか、それとも正電荷を持つ正孔であるかによって変わります。さらにその値は電荷担体密度に依存します。このことから、ホール効果は導電性物質内での電荷輸送のメカニズムを調べるための重要な手段となるために、ドーピング型半導体の研究にしばしば利用されてきました。

本実験では、不純物をドーピングしたゲルマニウム結晶を使って 300K ~ 450K の温度範囲にわたって実験を行います。試料には、電流 I が流れる方向の長さが a で、幅 b 、厚さ d の平たい長方形をした結晶を使用します。磁場 B は試料に、電流と垂直な方向に印加されます。その結果として生じるホール電圧は、以下ようになります。

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

ホール係数は、

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

ここで、 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ アンペア・秒は素電荷です。

伝導帯にある電子の密度 n_n と移動度 μ_n 、価電子帯の正孔の密度 n_p と移動度 μ_p は物質に固有の量であり、試料の温度に依存します。

実験で電気伝導率を得るには、ホール電圧以外にも、試料内の電流方向の電圧降下 U を測定する必要があります。(セット番号 UE6020100 の実験を参照)

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

この過程で、ホール移動度も求められます。

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

電荷担体の密度 n_n と n_p の値は、ドーピング（結晶内への異種原子の導入）によって変化します。p 型ドーピングの場合、アクセプター原子は価電子帯にある電子と結合することで、価電子帯に正孔を生じさせます。n 型ドーピングの場合、ドナー原子の各々は伝導帯に 1 つずつの電子を供給します。

ドーピング後の結晶は電気的に中性であり、正と負の電荷は互いに相殺します。このことから、以下の関係式が導かれます。

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

n_A : アクセプターの濃度
 n_D : ドナーの濃度

電荷担体の密度 n_n と n_p との間には質量作用の法則による関係があり、熱平衡状態においては、単位時間当たり発生する電子・正孔対の生成と再結合の回数は同数になります。このことから、次の式が適用できます。

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

n_i は、真性電気伝導の場合の電荷担体密度です (セット番号 UE6020100 の実験を参照)。

したがって、(5) 式と (6) 式から一般的に、電荷担体の密度は以下の式で表されます。

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

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

室温ではアクセプターの濃度 n_A とドナーの濃度 n_D は、真性電気伝導の場合の電荷担体密度 n_i よりも、かなり大きな値を持ちます。

以上から n 型ドーピングの場合、温度が 300K でホール係数は、

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

となり、p 型ドーピングの場合、温度が 300K では、

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

という結果が得られます。

これらより、電荷担体の符号と密度は、ホール係数から直接読み取ることができます。また、電荷担体の移動度は、ホール移動度と同じになります。

評価

温度が上昇するにつれて、電流の担い手である電荷担体の数が増加する一方で、ホール電圧は減少し、ついにはその値がゼロに達します。

電子の移動度 μ_n の方が正孔の移動度 μ_p よりも大きいことから、p 型ゲルマニウムの場合には真性伝導率の増加は電子の影響を増大させて、ホール電圧の符号を変えます。逆転温度以下ではドーピングによる電気伝導が主であるのに対して、逆転温度より上の温度領域では真性電気伝導が主な電気伝導のメカニズムになります。

高温では、n 型ドーピングと p 型ドーピングの結晶は、区別がつかなくなり、以下の関係が成り立つようになります。

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

移動度 μ_n と μ_p の温度依存性は、高温ではどちらも、

$$\mu \sim T^{\frac{3}{2}} \quad (\text{セット番号 UE6020100 の実験内容も参照のこと})$$

となるために、ホール係数を調べるだけでは、これらの温度依存性を明らかにすることはできません。

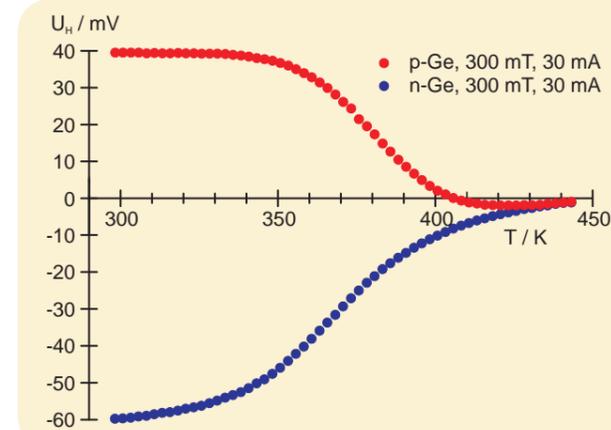


図 1: p 型と n 型のゲルマニウムにおける、ホール電圧の温度 T への依存性

● 仕様は予告なく変更されることがあります。
● 品番・品名をクリックすると製品仕様ページ（外部サイト）が開きます。