



目的

ゲルマニウムのバンドギャップを測定すること。

まとめ

半導体は高温において、大きな電気伝導性を示します。これは、電子のエネルギーレベルを表すバンド構造が、伝導帯と価電子帯とその間にある禁制帯と呼ばれる中間領域から構成されていることに起因しています（不純物を含まないノンドーブ型の半導体の場合には、禁制帯に電子が占有状態を持つことはできません）。ところが温度が上昇するにつれて、

より多くの電子が価電子帯に「正孔」と呼ばれる欠損を作って伝導帯に熱励起されます。

電場を印加すると、これらの正孔はあたかも正の電荷を持つ粒子であるかのように移動をするために、電子と同様に電流を発生させます。結晶中に定電流を通して、電圧降下と温度の関係を測定することにより、不純物を含まないノンドーブ型ゲルマニウムの電気伝導率が求められます。この測定結果は、バンドギャップを主要なパラメータに含む指数関数によって良い近似式で表されます。

必要機器

品番	品名	数量
U8487010	ノンドーブ Ge 搭載プリント回路基板	1
U8487000	ホール効果実験セット	1
U13265	支柱用台座	1
U138021	75cm プラグ付き安全リード線・15 本セット	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
-------------	---

追加推奨機器

U8487020	P ドープ Ge 搭載プリント回路基板	1
U8487030	N ドープ Ge 搭載プリント回路基板	1
U11300-115	3B NETlog™ (100V, 50/60Hz)	1
U11310	Windows® 用 3B NETlab™	1

基本原理

電気伝導率は、物質の性質に強く依存しています。このことから、物質を電気伝導率で分類することが一般になされています。比較的高温で顕著な電気伝導率を示す固体は、半導体に分類されます。こうした温度依存性は、電子のエネルギー準位を表すバンド構造が伝導帯と価電子帯とその間にある禁制帯と呼ばれる中間領域から構成されていることに起因しています（不純物を含まないノンドーブ型の半導体の場合には、禁制帯に電子が占有状態を持つことはできません）。

基底状態において、価電子帯は電子が占有する最もエネルギーの高いバンドであり、伝導帯はこれよりもエネルギーが高く、電子が存在しない（非占有の）バンドになります。これらのバンドの間のギャップは E_g と記されますが、その値は物質によって異なります。ゲルマニウムの場合、この値は約 0.7eV です。温度が上昇するにつれて、より多くの電子が価電子帯に「正孔」と呼ばれる欠損を作って伝導帯に熱励起されます。電場 E を印加すると、これらの正孔はあたかも正の電荷を持つ粒子であるかのように移動し、電子と同様に電流を発生させます（図 1 参照）。

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

ここで σ は、半導体の電気伝導率を表します。

電子と正孔は、異なる平均ドリフト速度で移動します。

$$(2) \quad v_n = -\mu_n \cdot E, \quad v_p = \mu_p \cdot E$$

μ_n ：電子の移動度， μ_p ：正孔の移動度

伝導帯に価電子帯から熱励起された電子による電気伝導率は、真性伝導率と呼ばれています。

熱平衡状態では、伝導帯にある電子数は価電子帯の正孔の数と同数であることから、真性伝導の場合の電流密度は以下のように書き表されます。

$$(3) \quad j_i = -e \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E$$

これから真性伝導率 σ_i は、

$$(4) \quad \sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

で与えられます。

電子や正孔は電荷のキャリア（担体）と呼ばれますが、それらの密度 n_i の温度依存性は以下の式で与えられます。

$$(5) \quad n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi}{h^2} \cdot \sqrt{m_n m_p} \cdot kT \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

ここで、 $k = 8.617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ はボルツマン定数、 h はプランク定数、 m_n は電子の有効質量、 m_p は正孔の有効質量、 T は試料の温度を表します。

電子と正孔の移動度 μ_n と μ_p もまた、温度依存性を持ちます。特に室温より上の温度領域で、移動度は以下のような温度依存性を持ちます。

$$(6) \quad \mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

ただし、温度依存性に関する主要な項は指数関数です。これは、高温における真性伝導率が、以下の形で表されることを意味します。

$$(7) \quad \sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

本実験では、不純物を含まないノンドーブのゲルマニウムの電気伝導率を求めるために、結晶中に定電流 I を通して電圧降下 U と温度の関係を測定します。この測定結果と以下の関係式から、電気伝導率 σ が以下の関係式を使って求められます。

$$(8) \quad U = a \cdot E, \quad I = b \cdot c \cdot j$$

ここで、 a は電流に平行な方向の試料の長さを表します。また、 b と c は電流に垂直な方向の試料の長さを表します。これらの関係式と式（1）を使って、電気伝導率 σ が以下のように求められます。

$$(9) \quad \sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$$

評価

式（7）は、以下の形に書き直すことが可能です。

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_g \cdot \frac{1}{2kT}$$

したがって、 $y = \ln \sigma$ を縦軸にとり、 $x = \frac{1}{2kT}$ を横軸にとって実験結果をグラフに描くと、得られる直線の勾配からバンドギャップ E_g が求められます。

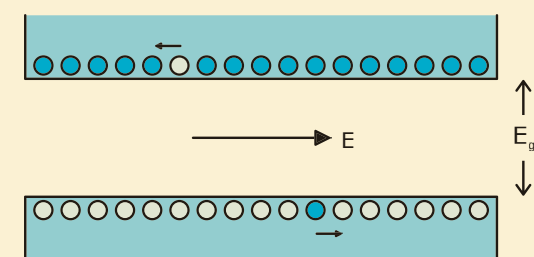


図 1：伝導帯にある 1 つの電子と価電子帯にある 1 つの正孔が電場 E によりドリフトする様子を表す、半導体のバンド構造

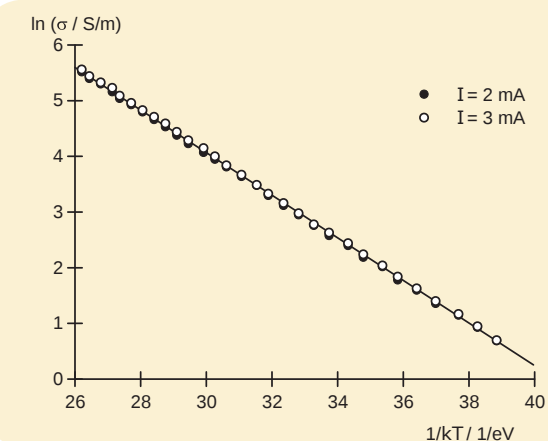


図 2：ゲルマニウムのバンドギャップ E_g の求め方

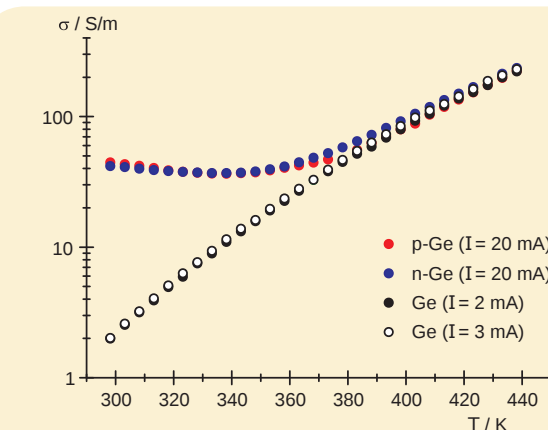


図 3：不純物を含まないゲルマニウムとドーブされたゲルマニウムの電気伝導率の比較

実験の手順

・ノンドーブ型ゲルマニウムにおける、電気伝導度の温度変化を測定します。

・価電子帯と伝導帯の間のバンドギャップを測定します。

注意

不純物がドーブされていない半導体の導電率である、真性導電率は実用上あまり重要ではありません。結晶には基本的に欠陥があり、それが電気伝導率に悪影響を与えています。そのために通常は、高純度の結晶にドナーかアクセプターをドーブして電気伝導率を高めます。こうしたドーピングの効果は、n 型と p 型のゲルマニウムを比較した場合に顕著になります。ドーブ後の結晶の電気伝導率は、室温ではノンドーブの半導体と比べてかなり高くなりますが、高温ではこの値は真性導電率に近づきます（図 3 参照）。なお、ホール係数の温度依存性はセット番号 UE6020200 の実験で、より詳細に調べられます。

応用実験

- 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。