

熱電素子の性能評価装置の作製

日大生産工(院) ○PAN YI 日本生産工(教授) 清水 耕作

1. 背景

金属や半導体に温度差を与えると、内部の電子が移動し、温度差に応じた電圧が生じる。この原理を利用して熱エネルギーを電気エネルギーに変換する熱電材料は、従来、有効活用が難しかった工場や自動車などからの未利用熱を電気として回収するための材料として期待されている。優れた熱電材料を開発するためには、熱電素子の性能指標を正確に求めることが重要であり、そのための研究が進められている。

$$V_H = \frac{IB}{nqt} \quad (2)$$

ここで、 V_H はホール電圧[V]、 I は試料に流れる電流[A]、 B は試料に加えらるる磁場の強さ[T]、 n はキャリア密度、 q は電荷[C]、 t は試料の厚さ[m]である。

2. 目的

熱電素子の性能を示す熱電性能指数 Z は次式で求められる。

$$Z = \frac{S^2\sigma}{\kappa} \quad (1)$$

ここで、 S はゼーベック係数[V/K]、 σ は導電率[S/m]、 κ は熱伝導率[W/mK]。

これらの係数間にはトレードオフが存在する。したがって、ある係数を向上させると他の係数に影響を及ぼすことが多く、これらのパラメータ間で最適なバランスを取ることが重要である。

測定用の装置を製作し、既知の材料のデータを測定することで、測定の正確性を判断する。装置の改良を通じて、誤差を引き起こす要因を解消し、測定時間を短縮することを目指している。これにより、熱電性能の各種係数を正確かつ迅速に測定し、熱電性能の最適なバランス点を見出すことを目標としている。

3. 実験方法および測定方法

3.1 ホール効果

試料に沿って一定の電流を流す。この電流によって試料内のキャリアが移動を開始する。電流が流れている状態で、試料に対して垂直に一樣な磁場を加える。この磁場により、移動するキャリアがローレンツ力を受け、試料の両端にホール電圧が発生する。以下の式によりキャリア密度を計算する。

3.2 ゼーベック係数

試料の両端に異なる温度を与えるため、一端を加熱し、もう一端を冷却する。これにより、試料内に温度差が生じる。温度差が生じた状態で、試料の両端に発生する熱電起電力をデジタル機器で測定する。そして、測定された温度差と起電力を用いて、以下の式によりゼーベック係数を計算する。

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3)$$

ここで、 S はゼーベック係数(μ V/K)、 ΔV は測定された電圧[V]、 ΔT は温度差[K]である。

測定端子と半導体材料の間に生じる接触抵抗を考慮し、測定には四端子法を使用する。この方法により、流れる電流による接触抵抗の影響を排除して測定が可能となる。

3.3 熱伝導率

既知の熱伝導率を持つ参照材料と未知の熱伝導率を持つ試料を直列に配置し、両者に同じ熱流束を通過させる。それぞれの試料の温度勾配を測定し、参照材料の特性と比較して未知試料の熱伝導率を求める。以下の式により熱伝導率を計算する。

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \quad (4)$$

ここで、 λ_1 は測定対象試料の熱伝導率、 λ_2 は参照材料の熱伝導率、 ΔT_2 は測定対象試料の

両端の温度差、 ΔT_1 は参照材料の両端の温度差である。

真空環境下で、素子を同じ表面積を持つ銅棒とステンレス棒の間に配置し、一端を加熱し、もう一端を冷却する。装置内部の温度が安定した後、銅棒とステンレス棒の中心温度を測定し、その温度差から素子の接触面の温度を推定する。最終的に、素子の熱伝導率を計算する。

4. 実験結果および検討

4.1 ホール効果

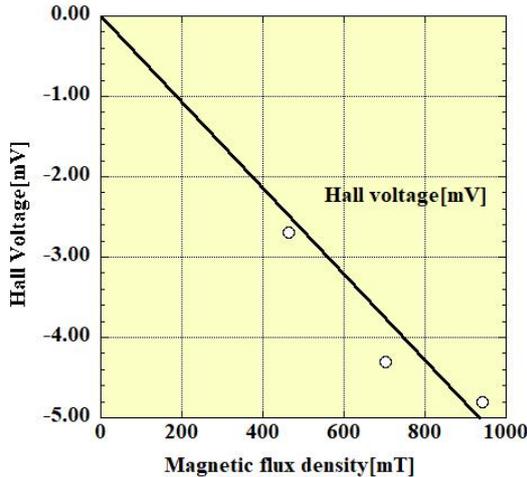


図1. ホール電圧と磁束密度の関係

P型シリコン基板における空孔濃度は、通常 $10^{15} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲であり、具体的な値はドーパント濃度に依存する。測定結果として、P型基板の空孔濃度は $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、P型基板の空孔濃度範囲内に収まっているため、装置が正常に測定できることが確認できた。

4.2 ゼーベック係数

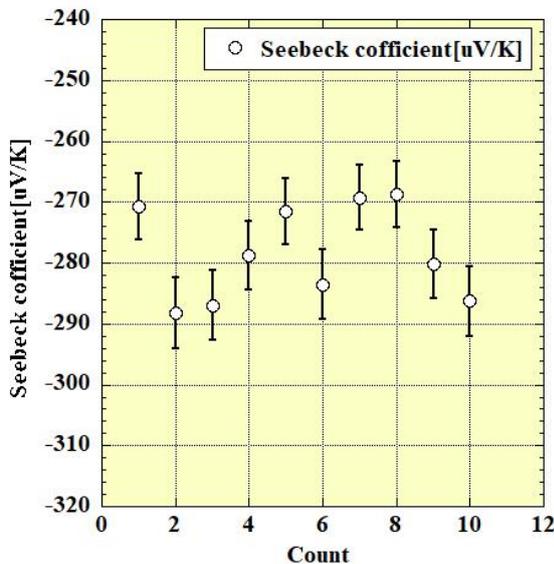


図2. ゼーベック係数

P型シリコン基板のSeebeck係数は、通常 $-100 \mu\text{V/K}$ から $-300 \mu\text{V/K}$ の範囲である。測定結果は $-270 \mu\text{V/K}$ から $-290 \mu\text{V/K}$ の間であり、範囲に収まっているため、装置が正常に測定できることが確認できた。

4.3 熱伝導率

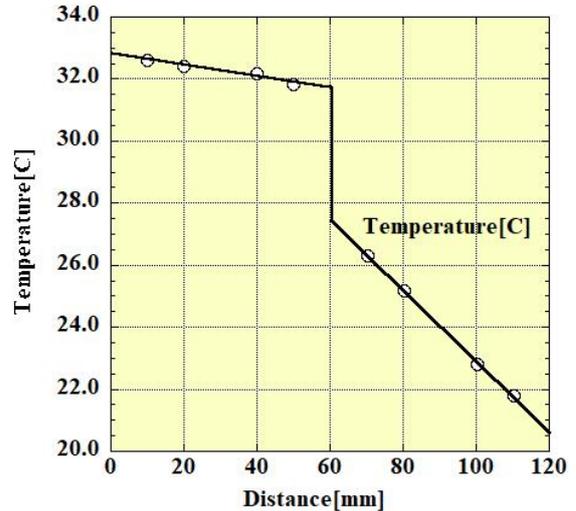


図3. 各点の温度

二酸化ケイ素基板の熱伝導率は約 $0.8 \sim 1.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の範囲内であり、実験結果から計算された値は $0.908 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ で、この範囲に収まっているため、装置が正常に測定できることが確認できた。

5. まとめ

既知の素子をテストすることで、装置が正確にデータを測定できることが確認された。四端子法を使用し、水冷装置を追加することで、結果の誤差が減少した。

今後の課題は、誤差を引き起こす可能性のある要因を特定し、それらを排除するために装置の改良を進めることである。また、測定精度に影響を与えない範囲で、実験時間を短縮することも目標となっている。

参考文献

- [1] 荒井大地、熱電変換素子に用いる Mg_2Si のpn制御について、日本大学生産工学部、2022
- [2] 柳田泰希、シリコンマグネシウムの熱電特性評価、日本大学生産工学部、2018