

ホール効果測定システム (Hall effect measurement system)

機器分析評価センター209号室

中津川 博

本装置は、半導体の抵抗率・ホール係数・ゼーベック係数を測定する装置(東陽テクニカ製・ResiTest8350)である。ホール係数及びゼーベック係数の符号からキャリアが電子であるか正孔であるかを同定する事に加えて、抵抗率とホール係数より、キャリア密度と移動度の分析も可能である。今回は、本装置の概略を述べた後、各種物理量の測定方法について紹介する。

● 装置の概略

ホール効果測定システム(東陽テクニカ製・ResiTest8300)は、図1のように、**計測ユニット部・マグネット部・試料ホルダー部・制御部**の四つのコンポーネントで構成されている。

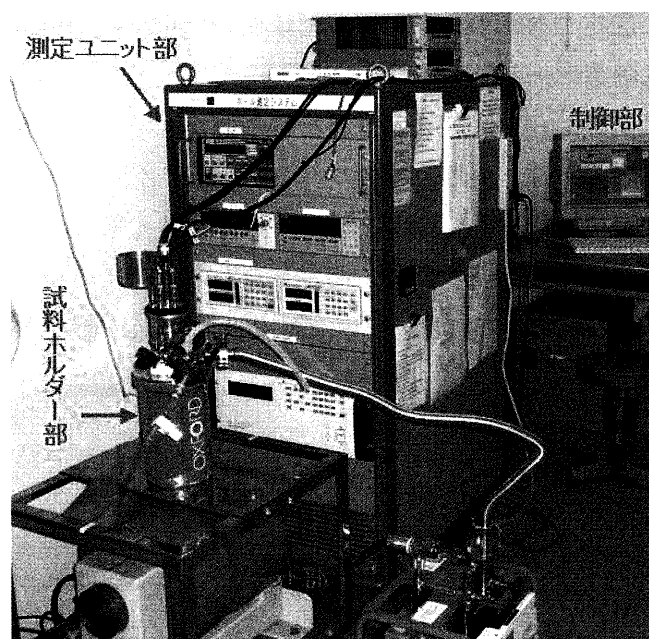


図1. ホール効果測定システム(東陽テクニカ製・ResiTest8300)

計測ユニット部は電流源(デジタルソースメータ・KEITHLEY 製 2400 型)・電圧計(ナノボルトメータ・KEITHLEY 製 2182 型)・温度コントローラ(LakeShore 製 330 型)から構成されており高精度の物性測定を保証している。抵抗率は $10 \mu \Omega \text{ cm} \sim 1 \text{ T} \omega \text{ cm}$ の範囲で測定可能であり、測定温度は $\pm 0.1 \text{ K}$ の精度で制御可能である。

マグネット部は標準 CS 型電磁石から成っており、磁場強度を自由かつ高速に変化させる事が可能で、最大 0.8 テスラまで磁場を印加する事ができる。循環水冷却式のコイルなので、長時間安定して強磁場を発生させる事が可能であり、外部冷却水設備は不要である。

試料ホルダー一部は LN 型クライオスタットと試料ロッドから構成されており、77K~400K の温度範囲で測定可能である。温度センサーは Si ダイオードを採用しており、室温から 77K まで 15 分で冷却可能である。試料ロッドは抵抗・ホール係数測定用とゼーベック係数測定用の二種類を使用している。

制御部はパソコンとソフトウェアで構成されているが、ResiTest8300 ソフトウェアは日本語版 Windows に完全対応しており、日本語によるメニュー表示と共に分かり易いヒューマンインターフェースが実現されている。また、測定データのバラツキや再現性を統計的な手法で処理する事により、測定結果の誤差範囲を推量しノイズレベルとして表示する事によって、データの信頼性を定量的に判断する事が可能になっている。測定結果はエクセル等の汎用ソフトウェアに読み込ませる事ができるので、データの整理や特殊な計算処理も容易に行える。

図 2 に示すように、新しい半導体の抵抗率やホール係数を測定するには、通常、測定の最適条件を試行錯誤で探すのに多くの時間を必要とするが、ResiTest8300 ソフトウェアで用意されている測定条件メニューに、印加電流値・印加磁場・ホール電圧の安定性判定・計測の速度等が含まれ適切に設定できるので、安定した状態で測定する事が可能である。無人でも測定を継続できる自動測定モード以外に、図 3 のように、手動測定に相当する確認機能もあり、自動測定の一部だけをトレースし、未知試料を自動測定する前に測定条件にアタリを付ける際に大変重宝する機能である。また、電極のオーミック接合チェックの為、IV 測定を行いその測定曲線をグラフ表示させる事も可能である。更に、図 4 に示す通り、温度変化させながら測定する際に、測定結果の温度依存性を測定しながらリアルタイムでグラフ表示させて確認する事も可能である。当然、これらのグラフは PDF 化して保存する事も可能である。

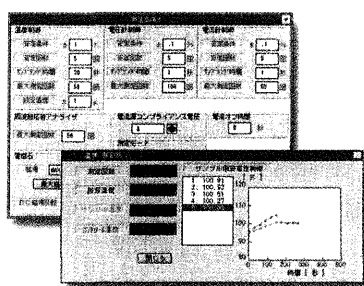


図 2. 測定条件メニュー

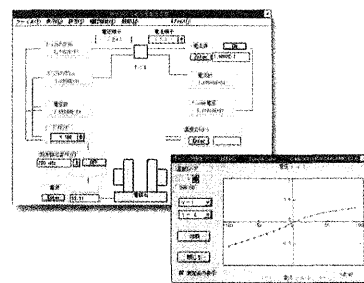


図 3.手動測定及び IV 測定

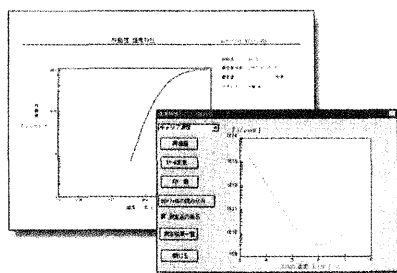


図 4. 測定結果の温度依存性

● 抵抗率測定

抵抗率の基本原理式は

$$\rho = \frac{S \Delta V}{I \Delta x} \quad (1.1)$$

で表される。ここで、 $\Delta V/\Delta x$ 、 S 、 I はそれぞれ試料の電流方向の電位傾斜、試料の断面積、試料に流れる電流である。図5に示すように、電圧端子間の降下電圧 V_r は標準抵抗 R_s の降下電圧 V_s の比として与えられるので、直方体試料の抵抗率は、

$$\rho = R_s \frac{V_r b t}{V_s L} = \frac{V_r S}{I L} \quad (1.2)$$

で表される。ここで、 b 、 t 、 L はそれぞれ試料の幅、試料の厚さ、電圧端子間距離である。本装置では、抵抗率を Van der Pauw 法を用いて測定している。一般的な抵抗率測定では、降下電圧測定端子間の電流密度を均一にする為に、ある程度長い直方体の試料が必要であるが、Van der Pauw 法を用いた測定では、この寸法制限に囚われることなく(薄膜でも)測定する事が可能である。この方法の測定試料形状を図6に示す。(a)は理想的な試料形状であるが、成形が困難な為、(b)に示す形状が実用的な観点から広く採用されている。抵抗率は、試料の厚さを t とすると、

$$\rho = \frac{\pi t (R_{AB,CD} + R_{BC,DA})}{\ln 2} f \quad (1.3)$$

で表される。ここで、 $R_{AB,CD}$ はAとB端子間に電流 I_{AB} を流した時、CとD端子間の降下電圧 V_{CD} と電流との比 V_{CD}/I_{AB} として定義される。同様に、 $R_{BC,DA}$ は V_{DA}/I_{BC} として定義される。また、 f は $R_{AB,CD}/R_{BC,DA}$ で与えられる抵抗比 R の関数としての係数である。

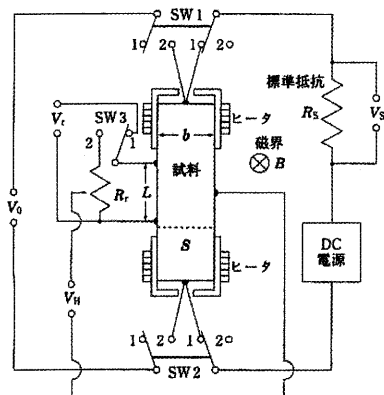
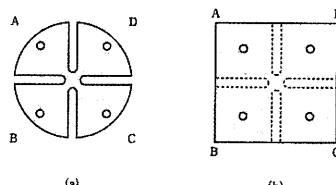


図5. 測定回路図

比抵抗、ホール係数およびゼーベック係数の測定回路。Sは試料の断面積(破線面)、磁界Bは紙面に垂直(表側から裏側方向)である。



ファン・デル・ポールの測定試料形状。(a):理想形状,(b):実用的形状。

図6. 測定試料形状

つまり、 $R > 1$ において、

$$\frac{R-1}{R+1} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left\{ \frac{\exp(\ln 2 - \ln f)}{2} \right\} \quad (1.4)$$

で与えられる。四端子が鏡面对称ならば、 $R_{AB,CD} = R_{BC,DA}$ 及び $f = 1$ となり、式(1.3)は、

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} R_{AB,CD} \quad (1.5)$$

となる。 $R = 2$ では f が 5% 以内の誤差になる事を保証するが、準備された試料の種々の形状から決定される f 値は、測定精度以内になるように数値解析によって導出する必要がある。

● ホール係数測定

ホール係数 R_H の実験的な決定の基本式は、

$$R_H = \frac{V_H t}{IB} \quad (1.6)$$

として表され、 V_H 及び B はそれぞれホール端子間の電位(ホール電圧)及び磁界である。ホール係数の測定は図 5 において、SW1,2 は No.1 の位置、SW3 は No.2 の位置にした回路によって行われる。 R_s は磁界を加える前のホール端子間電位をゼロ電位近くにする為に使用する。試料に流れる電流と垂直に磁界を加えると、これらに垂直方向のホール端子間に電位 V_H が誘導されるのである。従って、ホール係数は

$$R_H = R_s \frac{V_H t}{V_s B} \quad (1.7)$$

で与えられ、電気伝導率 $\sigma = en\mu$ より、キャリア濃度 n と移動度 μ は以下の式で与えられる。

$$n = \frac{1}{eR_H}, \mu = \frac{1}{en\rho} \quad (1.8)$$

● ゼーベック係数測定

小型ヒータの通電量を変える事で、試料両端に温度差 ΔT を与えると、熱起電力 V_0 は図 5 のように、SW1,2 の No.2 の位置にした回路によって測定される。従って、ゼーベック係数は

$$\alpha = \frac{V_0}{\Delta T} \quad (1.9)$$

で与えられる。 ΔT を大きく取れば測定は容易であるが、一般に、式(1.9)の温度特性は直線的ではないので思わぬ測定誤差を生じる場合があるので注意が必要である。本装置では、 $\Delta T \square 3K$ として測定した $V_0 - T$ 特性の勾配からゼーベック係数を決定している。一般に、キャリアが電子であれば $\alpha < 0$ であり、正孔であれば $\alpha > 0$ である。