

< 実践報告・資料 >

四探針法による抵抗率測定装置の 多機能化の試み

Multifunctionalization of a resistivity measurement system
by using the four-point probe method

北海道職業能力開発大学校

飯 塚 浩 一
柳 潔
児見山 暁

四探針法による抵抗率測定装置の多機能化の試み

北海道職業能力開発大学校 飯塚 浩一
柳 潔*
児見山 暁

Multifunctionalization of a resistivity measurement system by using the four-point probe method

Kouichi IIZUKA, Kiyoshi YANAGI, Akira KOMIYAMA

要約 職業能力開発大学校応用課程の開発課題実習として、四探針法による抵抗率測定装置の多機能化に取り組んだ。開始時に、市販の四探針法による測定装置を調査したところ、多くは、大面積で平面形状を有する試料が測定対象となっていた。そこで、①小面積試料の測定が行なえる、②針の長い四探針プローブにより曲面形状に対応できる、③レーザ変位計を用いて表面形状の3次元計測が行なえる、といった機能を有する装置の開発をめざした。1年の年限内で行なった本開発では、残された技術的課題があるものの、装置の評価結果はその有用性を示している。本開発課題実習の課題設定では、教材的価値、社会的価値、教授方略の3点に注意した。終了後の課題に対する学生の感想は非常に良好であった。このように、開発課題の設定の考え方、および、指導方法の考え方についても収穫があった。

I はじめに

四探針法による抵抗率測定は、測定が簡便なため、性能の高い自動測定装置が数多く製品化されている。これらの装置を調査したところ、測定対象の試料形状として大面積で平面形状のものを標準としているものがほとんどであった。しかし、研究・開発で扱われる導電性材料は、チップ状の半導体基板や、湾曲したガラス基板に形成した薄膜などその形状は多種多様であるため、このような装置では測定できる試料形状が限られ不便であると考えられる。そこで、半導体ウェハなどの大面積で平面形状の試料に加え、チップ状の小面積試料や曲面形状の試料も測定可能な抵抗率測定装置の開発を、職業能力開発大学校応用課程の開発課題実習の枠組みで1年の年限で行なった。本報告では、本開発課題実習の課題設定の考え方についても述べる。

II 四探針法の理論

図1に、四探針の端子配置を示す。通常の抵抗率測定では端子1および4を電流端子、端子2および3を電圧端子とし、端子1から4へ電流 I_{14} を流したときの電圧端子23間の電圧 V_{23} を測定する（以後、端子配置Aと呼ぶ）。試料の形状と、試料に接触している針の接触点の配置とに応じた特性値である形状因子を R 、試料厚を t とし、 V_{23}/I_{14} を R_A とおくと、抵抗率 ρ は、

$$\rho = FtR_A \tag{1}$$

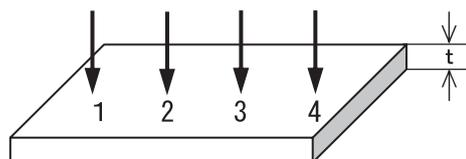


図1 四探針の端子配置

となる。本報告では、端子配置Aを用いた測定を従来法と呼ぶこととする。従来法では、あらかじめ形状因子を求めておく必要がある。大面積、かつ、充分薄い平面形状薄膜の場合は、 $F = \pi / \ln 2 \equiv F_A$ である。

これに対して米国材料試験協会 (American Society of Testing and Materials) で開発された抵抗率測定法がある⁽¹⁾。以後、これをASTM法と呼ぶ。

ASTM法では、端子1および3を電流端子、端子2および4を電圧端子とし、電流端子1から電流端子3へ電流 I_{13} を流したときの電圧端子24間の電圧 V_{24} の測定も行なう (端子配置Bと呼ぶ)。 V_{24}/I_{13} を R_B とすると、端子配置Aで測定した R_A の結果も使い、

$$F = \pi \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) f \equiv F_{\text{ASTM}}, \quad (2)$$

$$\frac{R_A - R_B}{R_A + R_B} = f \sinh^{-1} \left[\frac{1}{2} \exp \left(-\frac{1}{f} \right) \right], \quad (3)$$

を解くことにより F が実験的に得られる。式(2)の f は R_B/R_A の関数で、式(3)から得られる。

ASTM法の大きな特長は、薄膜試料であれば測定から形状因子を求められることである。そのため、任意形状の小面積基板にも適用できる。また、曲面形状薄膜へも適用できる。曲面形状薄膜に適用できる理由は以下による。一般に針は等間隔に取り付けられており、針先端の間隔が等間隔であるということを前提にして形状因子を求めている。等間隔に並んだ針を曲面形状薄膜に接触させた場合、形状に応じて各々の針先端間距離が異なるようになり、平面形状薄膜に接触させたように針先端間距離が等しくなるとは限らない。しかし、ASTM法によって形状因子を算出する際、式(2)および(3)では針先端間距離の値を必要としないため、この針先端間距離の違いが問題とはならない。

ところで、従来法でもあらかじめ形状因子が得られていれば、小面積基板や曲面形状基板なども測定が可能である。しかし、多くの市販の抵抗率測定装置で大面積・平面形状試料を測定対象としているのは、試料の形状と針の接触点の配置の両方に依存する特性値である形状因子を、あらゆる形状の試料に対して用意することが技術的にも費用の面からも難しいためである。

III 抵抗率測定装置の開発

1 開発目標

小面積試料や曲面形状試料に対する測定を可能とするため、開発目標を、①ASTM法による小面積試料

の抵抗率測定ができるようにする、②3次元表面形状に対応可能な四探針プローブ (以後、プローブと呼ぶ) を試作する、③表面形状の3次元計測が行なえ、その取得データを抵抗率測定へ利用できる、の3点とした。

2 装置の構成

2.1 全体の構成

図2に装置の全景を示す。装置は、可動部、測定部、制御部、操作・表示部で構成される。可動部は、テーブルとアームからなる。テーブルは任意の測定位置に試料を移動させる。アームはプローブを下降させ試料に接触させる。測定部はプローブとレーザ変位計用センサヘッドからなる。レーザ変位計センサヘッドは、アーム後方に取り付ける。制御部には、マイコンが搭載され全体を制御する。操作・表示部は、パソコン (以後、これをPCと呼ぶ) で構成される。

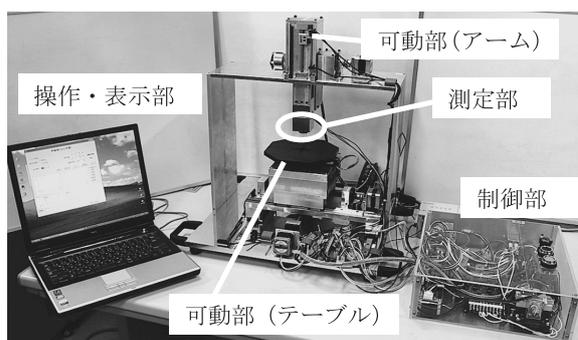


図2 開発した装置

2.2 装置各部の特徴

(1) 可動部

テーブルは、X軸・Y軸およびC軸 (水平面内回転) の3軸で動作する。移動距離は、X軸140mm、Y軸190mmである。

アームは、上下 (Z軸) に移動する。駆動はステッピングモータとラック&ピニオンで行なっている。アームには、今回開発するプローブの他に、当校が所有する一般的な四探針プローブ (共和理研製K89PS) も取り付けることができたようにした。

(2) 測定部

図3に試作した2種類のプローブを示す。プローブは針とそれを支えるプローブヘッドからなる。今回、針そのものは電子回路の導通検査用針 (ミスミ社製NP45HD-C (プローブP1に使用)、NP38-C (プローブP2に使用)) を使い、学生はプローブヘッドを設計・製作した。手元にある曲率半径11.2mmと7.5mmのガラス基板に接触させることを念頭におき、プローブか

ら出る針の長さを長くした。針の長さを測定したところ、プローブP1が15.8mm、プローブP2が10.5mmであった。当校所有のプローブの針の長さは2mmである。

3次元計測には、レーザ変位計（KEYENCE社製 LK-080）を使用した。3次元画像化は、Microsoft社のDirectX⁽²⁾を、また、開発言語はMicrosoft社のVisualBasic.NETを使用した。

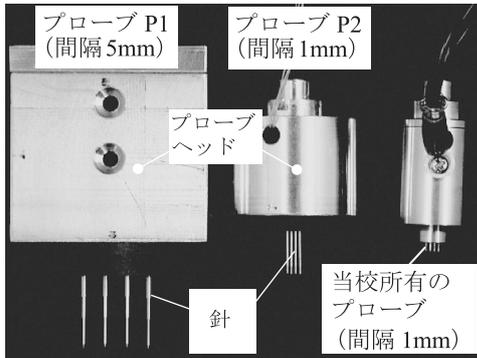


図3 新しく試作したプローブ（左と中央のもの）

(3) 制御部

図4に設計・製作した制御回路基板を示す。制御回路は、H8マイコンを搭載し、後述する抵抗率測定システムをはじめ、ステッピングモータ用ドライバ、可動部位置決め用センサ、レーザ変位計などの制御、PC間とのデータ授受を行なっている。

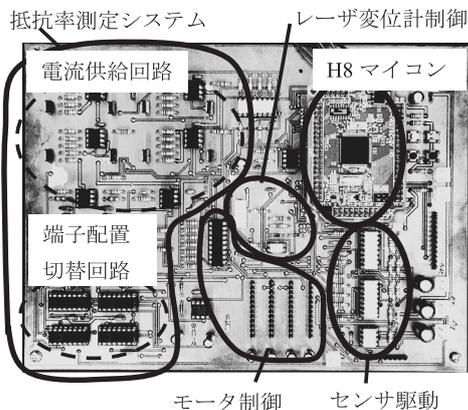


図4 制御回路（主基板）

図5に設計した抵抗率測定システムの構成を示す。端子配置切替回路が電流・電圧端子の配置を各測定に応じて変更する。これにより、従来法、ASTM法、試料への接触判定、伝導形判別の4つの測定を実現する。測定手順は、①電流端子1の電位検出により、試料と探針との電氣的接触を確認する、②接触確認後、2通りの電流・電圧端子配置について試料電流電圧特性（ $I_{14}-V_{23}$ 特性、 $I_{13}-V_{24}$ 特性）を測定する、③試料が半導体の場合は、端子13間に電圧 V_{13} を印加して求め

られる $V_{23}-V_{13}$ 特性から伝導形判別も行う、とした。伝導形判別は、交流で行う点接触整流法⁽³⁾を少し変更した。 V_{13} の印加にはH8マイコンのD/A出力を用いているため印加可能な電圧範囲は0Vから5Vまでである。判別の原理を付録に示した。

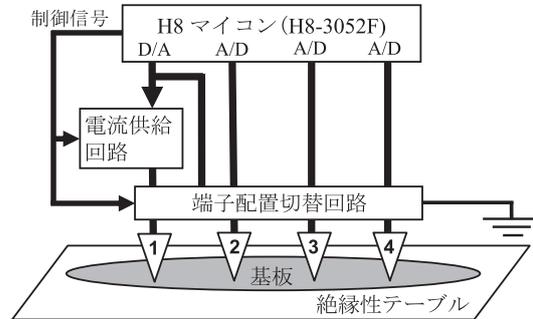


図5 測定システムの構成

(4) 操作・表示部

図6は、操作・表示画面である。従来法による測定では形状パラメータを入力し、測定を開始する。試料電流電圧特性は逐次グラフ表示される。ASTM法による測定では、形状パラメータの入力の必要はない。

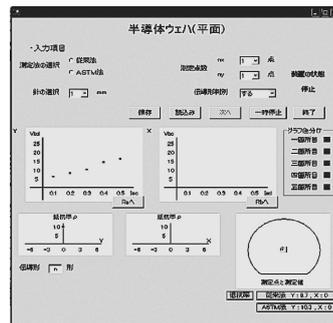


図6 操作・表示画面（半導体ウェハの場合）

3 装置の評価

3.1 ASTM法による抵抗率測定

異なる形状のn形半導体基板（公称値10Ωcm）について本装置を用いて抵抗率を測定した。3.2で後述するように試作したプローブは半導体基板に対する測定に使用することができなかった。そこで、プローブは2.1(1)で述べた当校所有のプローブを使用した。試料アからオの半導体基板（厚さ625μm）のそれぞれの大きさは、ア:5cm×5cm、イ:5cm×2cm、ウ:5cm×1cm、エ:1cm×1cm、オ:5cm×0.5cmである。

まず、針間隔に比べて試料の大きさが十分に大きいとみなせる試料アを従来法により測定した。その結果、抵抗率は、10.5Ωcmと測定され、開発した測定シス

テムは基本的には大きな問題がないことがわかった。

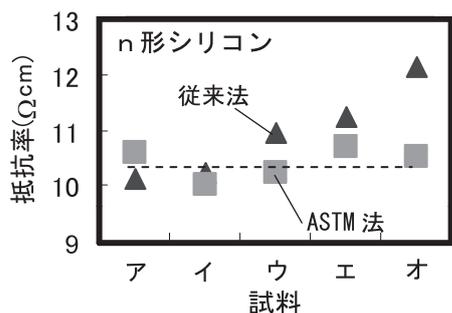


図7 従来法とASTM法による抵抗率の比較

表1 形状因子の値

試料	ア	イ	ウ	エ	オ
F_{ASTM}/F_A	1.040	0.980	0.934	0.931	0.867
F_{RA}/F_A	1.000	0.983	0.935	0.931	0.715

次に、従来法とASTM法とで、測定結果の比較を行った。図7にその結果を示す。また、表1に、 F_{ASTM} を F_A で規格化した値と、比較のために長方形薄膜 (Rectangular Slice) の形状因子 (ここでは F_{RA} と呼ぶ) の理論値⁽⁴⁾を F_A で規格化した値とを示す。文献(4)には代表的な形状の形状因子が数表や図でまとめられている。図7によれば、抵抗率は形状に依存しない特性値であるにもかかわらず、従来法での値は、基板が小さくなるにつれて公称値より大きく算出されている。一方、ASTM法では異なる形状においてもほぼ同程度の値が得られた。これは、基板ごとの測定から算出して得られるASTM法の形状因子が適切なためである。このことは F_{ASTM} が F_{RA} とほぼ等しいことからわかる。このようにASTM法による測定が可能な本装置はその有用性が高くなっている。

3.2 試作したプローブの評価

図8 (a) に、試作したプローブP1を円筒形のガラス基板 (曲率半径11.2mm) に接触させた様子を示す。比較のため、当校で所有するプローブの場合を図8 (b) に示した。今回試作に採用した導通検査用針は、①針が細いためプローブがやや曲がってしまう、②平面形状基板の導電性薄膜の測定には使用できたが、開発課題実習で扱った半導体基板の測定には使用できなかった、という問題が生じた。①では、測定可能な曲面の凹凸の程度や、接触面への入射角などを数量的に明らかにすることが、また②では、当校が所有している、一般的な市販のプローブを用いると半導体基板の抵抗率を測定できることから、今回の原因を明らかにすることが課題として残されている。しかし、図に

示すように、従来のプローブでは針が短く接触できなかった曲面試料にも接触できることがわかり、このことは本プローブの有用性を示している。

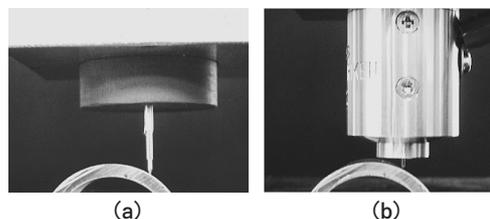


図8 試作したプローブP1を同じ試料に接触させた様子

3.3 3次元形状測定

図9に、炭化チタン膜が成膜されているアーチ型ガラス基板 (曲率半径7.5mm) と、その描画画像を示す。測定間隔が1mmであるため描画画像がやや粗いが表面形状データ取得のための個別動作プログラムは開発できた。ところで、代表的な形状の形状因子が数表や図で整理されている文献(4)をデータベース化し、測定した形状をパラメータとしてこれに利用できれば、代表的な形状の試料に対してのみではあるが、従来法においても形状因子を用意する手間が省けると考えた。ただ今回は、取得した形状データを抵抗率算出に自動的に反映させて手間を省くような従来法用測定プログラムの実現までには至らなかった。

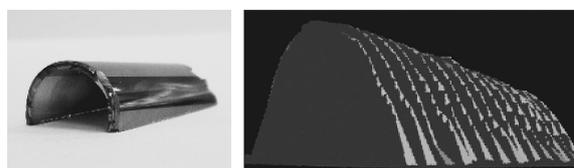


図9 3次元計測画像

3.4 半導体の伝導形判別

伝導形判別は対象が半導体材料の場合にのみ用いられる機能であるため、この機能の開発を先に掲げた開発目標には加えなかった。しかし、この機能が本装置に加わることで装置の有用性がさらに高くなると考えて今回取り組んだ。その結果をここで述べておく。

図10に抵抗率10Ωcm (公称値) のp形・n形それぞれのシリコン基板に対しての V_{23} - V_{13} 特性を示す。測定には当校が所有するプローブを使用した。伝導形の違いにより、 V_{23} が大きく異なっている。 V_{13} が大きくなるほど、伝導形の違いによる V_{23} の違いが大きくなることがわかる。今回は、 V_{13} としてマイコンのD/A出力の最大電圧である5Vを印加して V_{23} の値を測定し、 V_{23} の値の違いにより伝導形の判別を行なった。

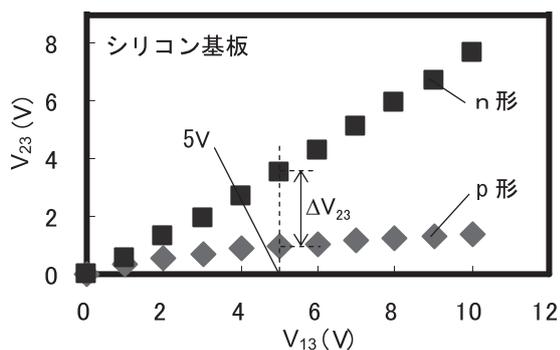


図10 半導体の伝導形判別

3.5 全体動作に関する評価

先に述べたように個別の動作は可能となったが、全体動作に関しては、1年の年限では開発目標に掲げた各機能を十分に連動させた動作には至らなかった。ただし、測定対象が半導体シリコン基板の場合については、①原点復帰、②操作・表示部のPCから測定パラメータ入力と抵抗率測定法選択（従来法、または、ASTM法）、③測定の開始（抵抗率測定、伝導形判別）、④測定結果（抵抗率、伝導形判別）の表示、という一連の測定動作が行えるところまで開発できた。

IV 本開発課題実習の課題設定の考え方

1 課題設定における3つのポイント

教育訓練効果を向上させるための課題設定には、教材的価値、社会的価値（実用的、あるいは、研究的価値）、教授方略の3つの点を検討しなければならないと考えている。この3点をすべて満たすことはむずかしい。商品価値・研究的価値の向上をねらい、機能の不要部分を取り除くと教材的価値が下がる。教材的価値を高めるため、学生1人1人に課題を与えると冗長性が増し、社会的価値は低くなる。また、興味を引き出し、力を伸ばすように教授方略を行なっているつもりでも効果に不確かさがつきまとう。筆者らは、教材的価値を第一におく指導が基本であると強く考えている。

2 本開発課題実習での各ポイントの考え方

2.1 教材的価値

装置の開発において各学生が取り組んでいる1つ1つのテーマが、そのまま各学生の卒業製作テーマになるようにする。「何かを教えようと考えて、そのための材料として用意するもの」⁶⁾が教材であるという考えによれば、「何か」がそのテーマである。そしてテ-

マの合成が装置の開発という1つの大テーマとなる。自分のテーマに責任を持って取り組み、さらに、相互の関係を意識するため、グループのまとまりにも良い効果をもたらす。自分の担当部分が明らかであるため、装置が完成した際に達成感も強くなる。学生の人数分のテーマ数となるため、装置の機能は冗長となるが、これを教材的価値の点から装置の欠点とは考えない。

開発は、生産機械システム技術科3名、生産電子システム技術科3名、生産情報システム技術科2名の計8名で行なった。各科の学生のテーマを以下に掲げる。

①生産機械システム技術科

- ・プローブの設計とその製作
- ・筐体本体（主にテーブル）の設計とその製作
- ・筐体本体（主にアーム）の設計とその製作

②生産電子システム技術科

- ・シーケンス制御用マイコンプログラムの作成
- ・抵抗率測定システムの回路設計
- ・抵抗率測定システム動作用プログラムの作成

③生産情報システム技術科

- ・装置操作GUIの開発
- ・3次元計測表示プログラムの作成

2.2 社会的価値

今回は、測定可能な試料形状の対象を広げて装置の価値を高める方針とした。通常、商品価値を高めるために、価格対性能比を考慮して不要な機能を削る方針をとることが多いが、我々は、教材的価値と矛盾しないためにも、機能を付加する方針で実施している。

2.3 教授方略

文献(5)には「学習への意欲に関する」研究成果として「ケラーのARCSモデル」が紹介されている。ケラー(J. M. Keller)は、個人の学習意欲を説明するための4因子理論を開発した。4因子とは、①面白そうだと振り向かせる「注意(Attention)」、②自分の興味に合致し、やりがいがありそうだと思う「関連性(Relevance)」、③不安もあるが、挑戦して何とかやればできそうだと思う「自信(Confidence)」、そして④やった結果を肯定的に感じられる「満足感(Satisfaction)」である。ARCSはその頭文字である。本開発課題実習では、課題開始時に、ARCSモデルのうちのARCの3因子を意識して行なうことにした。具体的には、図11に示す開発装置の青写真を最初に示してしまう。全くの無から考えさせるのではなく、少し種を与えていることになる。市販の装置に足りない

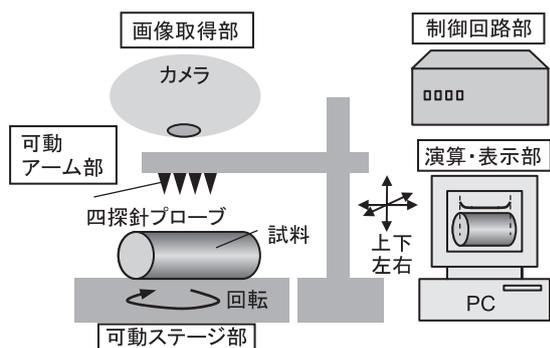


図11 装置の青写真として課題開始時に示した図

機能を加え付加価値を高める点を説明して「注意 (A)」と「関連性 (R)」をうながす。開発に必要な技術要素が、各科で行なった「標準課題実習」の延長上にあることを示して「自信 (C)」を持たせる。

学生たちは、彼らの創造により種に具体性を与える。学生は、自ら設計・製作して具現化したという自負がわくであろう。最終的には、装置を作り上げることで「満足感 (S)」も達成できる。

3 課題終了後の学生の感想

1年を振り返り、自己の反省点や、課題に対する意見を自由に記述してもらった。「装置全体が組みあがったときの感動は今でも覚えている」、「自分で自分の事を褒めてやりたいと思えるほど頑張れた」、「班としては、みんな仲良く、困ったら助け合えるいいチームである」など、回答の内容は非常に良好であった。これは、今回の課題設定の考え方が理由の一つであると考えている。筆者らは以前、開発課題実習に取り組んだ学生の学習方略特性の調査をもとに、その開発課題が持つ効果を評価した⁽⁶⁾。今後、学生の能力の向上を観察し、課題設定の考え方の良否の評価を進めたい。

V まとめ

1. 大きさの異なるn形シリコンチップの抵抗率を、本装置の抵抗率測定システムを用いてASTM法により測定した。測定値は、いずれも公称値とほぼ同じであり、小面積試料の測定が可能となった。
2. 針の足の長いプローブを試作した。従来のプローブでは針が短くて接触できなかった曲面にも接触でき、プローブの有用性が認められた。
3. レーザ変位計による3次元形状計測機能を検討した。炭化チタン膜の形状データを取得できた。
4. 四探針を用いる半導体の伝導形判別システムを開発した。抵抗率10Ωcm (公称値) のp形・n形シリコ

ン基板について判別が可能であった。

5. 課題終了後の感想は非常に良好であった。これは、教材的価値、社会的価値、教授方略の3点に注意して課題設定したことが理由の一つであると考えている。

謝辞

平成20年度卒業生の鈴木友也君、谷川倫彦君、南部亮一君、上野雅仁君、佐藤耕次君、高村和樹君、宇城昂記君、小川このみさんの労をねぎらいます。

また、北海道工業大学教授の下妻光夫先生には、貴重な炭化チタン薄膜試料を提供していただきました。ここにお礼申し上げます。

[参考文献]

- (1) M.Yamashita et.al., Resistivity Measurement by Dual-Configuration Four-Probe Method, JJAP 42 (2003) pp.695-699
- (2) 大概 有一郎、15歳からはじめるDirectX 9 3Dゲームプログラミング教室 Visual Basic編、ラトルズ、2007年、pp.94-140
- (3) Keithley Application Note Series, No.2615 (2005)
- (4) Haldor Topsoe reference book on geometric factors in four point resistivity measurement, 2nd.ed., (1968) pp.53-59
- (5) 鈴木克明、教材設計マニュアル、北大路書房、2002年、pp.176-179
- (6) 飯塚 他、試料への電気配線を必要としない自動ホール効果測定装置の開発、応用物理教育、第33巻1号、2009年、pp.13-18

[付録] 本装置における点接触整流法

本方法では、端子3を電圧の基準として端子13間に正電圧 V_{13} を印加し、 V_{23} を測定する。端子4は開放とする。原理を以下に述べる。 V_{13} を印加すると、試料電流 I_{13} が流れる。p形基板の場合、接点1は逆方向のショットキー接触であるため I_{13} は小さく V_{23} はさほど上昇しない。しかし、n形基板の場合、接点1は順方向のショットキー接触であるため I_{13} は大きく V_{23} は大きい。この V_{23} の大小で伝導形を判別する。本方法は試料電流の大小で判別するため、試料電流がもともと小さくなってしまふ抵抗率の大きな試料に対しては伝導形の違いによる I_{13} の差が出にくく判別が難しい。このときは、 V_{13} を大きくするなどの工夫が必要である。