

## 2次元における電気伝導度 (10点)

問題に着手する前に、別の封筒に入っている「全般的な注意」をよく読むこと。

### イントロダクション

コンピュータチップや太陽電池など、半導体技術に基づく次世代デバイスを開発するにあたり、研究者は、低い電気抵抗率を持つなど、優れた輸送特性を示す材料を探している。それらの特性の測定は、有限の大きさの試料、有限の接触抵抗、そして特定の形状の接点を用いて行われる。材料の真の特性を求めるためには、これらの効果を考慮しなければならない。また、薄膜材料は分厚い材料と振る舞いが異なる可能性がある。

この課題では、電気的特性の測定を扱う。それに関し、以下の二つの量を定義する。

- **抵抗  $R$ :** 抵抗は、試料ないしはデバイスの電気的な性質で、様々なサイズの、個々の試料についての測定値である。
- **抵抗率  $\rho$ :** 抵抗率は、抵抗を決定する物質の特性である。それは、物質、そして温度などの外部パラメータに依存するが、試料の形状には依存しない。

本課題では、いわゆる面抵抗率を測定する。これは、抵抗率を薄い膜の厚さで割った値のことである。

我々は、薄膜の電気抵抗の測定に関し、次のパラメータの影響を調べる：

- 測定に用いる回路、
- 測定電極の配置、
- そして試料の形状。

試料としては、導電性の紙と、シリコンウェハ（半導体デバイスの原料）に金属膜を付けたものを用いる。

## 材料のリスト

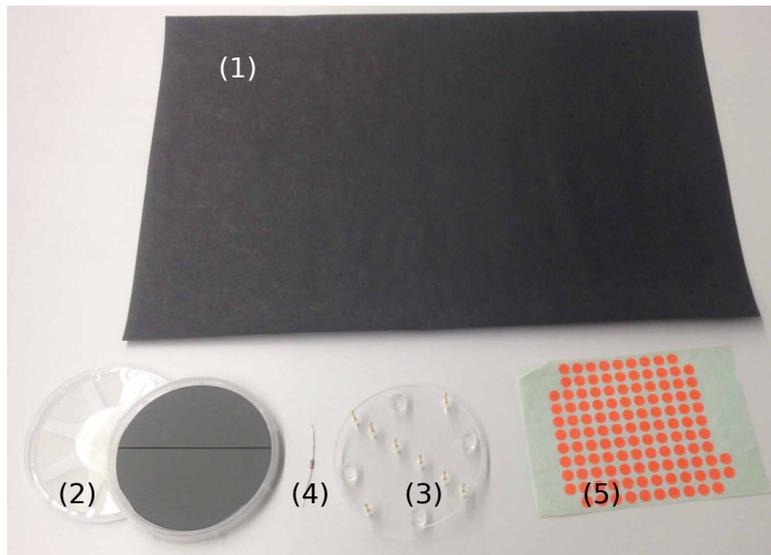


図 1: この実験問題用の追加の器具

1. 黒鉛でコーティングされた導電性の紙
2. クロム金属が薄くコーティングされているシリコンウェハ（ウェハ容器の中にしまっている）
3. バネ付きピンが 8 本取り付けられているアクリルガラス
4. オーム抵抗
5. 色付きのシール

## 重要な注意

- ・ シリコンウェハは落としたり曲げたりすると破損してしまう。金属のコーティングされている光沢面に触れたり引っかいたりしないこと。

## 指示

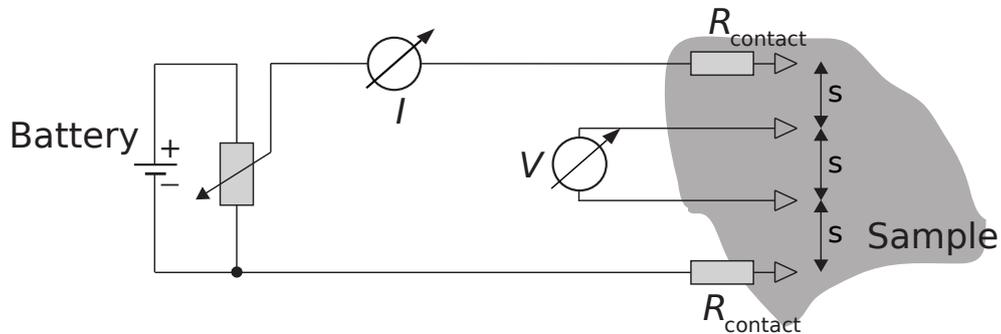
- ・ 以下括弧内の番号は、「全般的な注意」中の写真で示された番号に対応する。この実験では、信号発生器を直流電源として用いる。このモードでは、信号発生器は一定の電圧を *voltage* ソケット (5) と *GND* ソケット (7) 間に出力する。
- ・ 電圧 (0V から 5V の範囲) は、左側の *adjust voltage* と書かれたポテンシオメーター (3) でドライバーを用いて調整することができる。
- ・ この実験を行う際には、信号発生器のスピーカー駆動機能が切り替えスイッチ (8) によってオフになっていることを確認せよ。このことは、*speaker amplitude* ソケット (6) と *GND* ソケット (7) 間の電圧を測定することで確認できる。スピーカー駆動機能がオフになっていれば、これら 2 端子間の電位差は 0 である。

## Part A. 四端子 (4PP) 測定法 (1.2 points)

試料の抵抗率を正確に測定するためには、電圧測定のための接触端子と、電流を流すための接触端子は別のものとするべきである。

このような測定方法は、四端子 (4PP) 測定法と呼ばれている。4つの接触端子はなるべく単純で対称に配置される。電流  $I$  は、外側の端子から試料に流され、試料中のあらゆる可能な経路を通して反対側の外側の端子から出て行く。その途中、試料上のある区間  $s$  において電圧  $V$  の測定を行う。

以下の図に示すように、各接触端子間の距離を等しく  $s$  として対称な配置にすることで、様々なことが単純になる。(図中の単語の訳: Sample= 試料、Battery= 電源、contact= 接触)



$I$  対  $V$  の曲線は試料の  $I-V$  特性を表し、これを用いて試料の抵抗を決定することができる。以下の問では、4PP 測定法のみを用いることとする。まず始めに、次の写真で示されているような8つの接触端子のうち、4つの等間隔な端子を用いる。

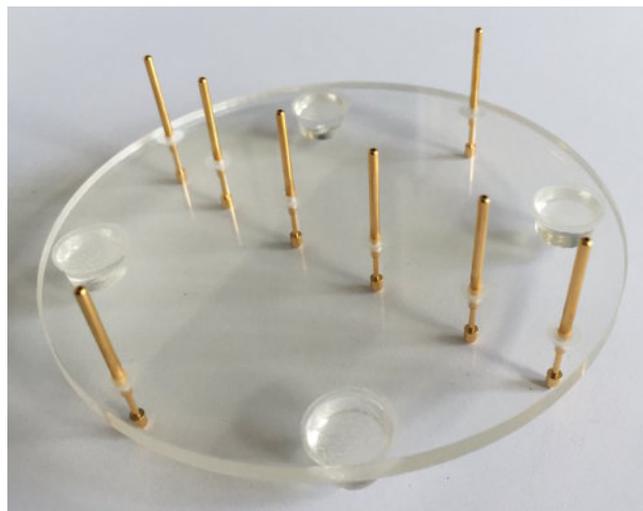


図 2: 四端子測定法で用いる4つのゴム足と8つの接触端子付きアクリルガラス板

次の測定では、導電性の紙のシート全体を用いること。

## 以下の全ての測定に関する重要なヒント

- シートの長辺が基準となる辺である。4端子はこれと平行な向きに配置されなければならない。
- コーティングされた黒い面を用いることに注意せよ。裏側の茶色い面ではない。正しい面に、色付きシールで目印を付けても良い。
- シートに穴が空いていないことを確認せよ。
- これらの測定では、可能な限り試料の中央に端子を接触させること。
- 試料に正しく接触させるため、各端子を十分よく押し付けること。プラスチックの足が表面に付けばよい。

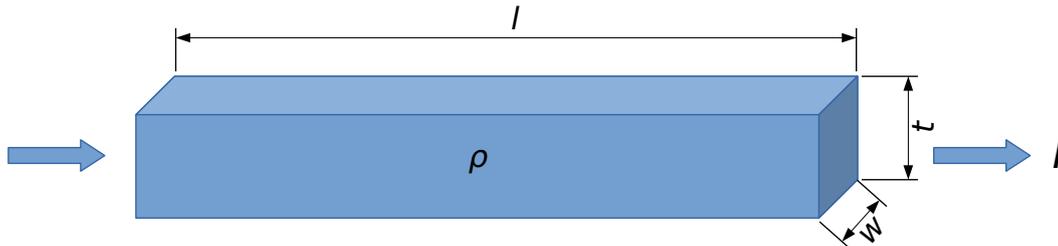
|            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>A.1</b> | 四端子 (4PP) 測定: 長さ $s$ の区間での電位降下 $V$ を、電流 $I$ の関数として測定せよ。4つ以上の電流値に対して測定を行い、測定した電圧降下と電流を表にまとめた上で、 <b>グラフ A.1</b> にグラフとしてプロットせよ。 | 0.6pt |
|------------|--|-------|

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>A.2</b> | <b>グラフ A.1</b> から得られるシート全体での実効的な電気抵抗 $R = \frac{V}{I}$ を決定せよ。 | 0.2pt |
|------------|---|-------|

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>A.3</b> | <b>グラフ A.1</b> を用いて、この 4PP 測定による抵抗 $R$ の不確かさ $\Delta R$ を求めよ。 | 0.4pt |
|------------|---|-------|

## Part B. 面抵抗率 (0.3 points)

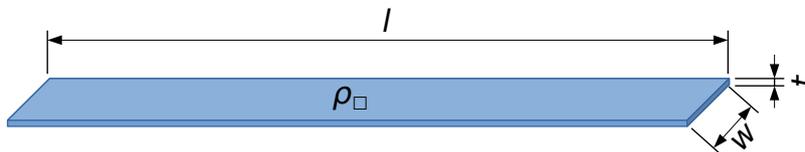
抵抗率  $\rho$  は物質の材料特性である。抵抗率を用いると、与えられた大きさの 3 次元的な導体の抵抗を計算することができる。まず、長さ  $l$ 、幅  $w$ 、厚さ  $t$  の角柱を考えよう。



上の図のように分厚い導体の電気抵抗は、次の式で与えられる。

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

同様にして、厚さが  $t \ll w$ 、 $t \ll l$  であるような 2 次元的な導体についての抵抗率を定義することができる。



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{\square} \equiv \rho/t$  ( $\rho_{\square}$  は、 $\rho$  に四角記号の添字) は面抵抗率である。面抵抗率の単位は、オームである ( $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$ )。

**重要:** 式 (2) は一様な電流密度で導体の断面が等電位な場合にのみ成り立つ式である。端子を点状に接触させている場合にはこの式は成り立たず、代わりに以下の式によって抵抗と面抵抗率を関係づけることができる。

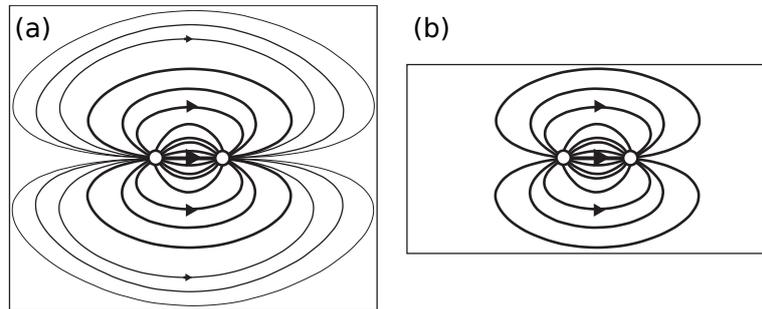
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

ただし、 $l, w \gg t$  である。

- B.1** Part A での四端子測定の結果から、このシートの面抵抗率  $\rho_{\square}$  を計算せよ。以下では、シート全体の大きさは接触端子の間隔  $s$  に比べて十分に大きいので ( $l, w \gg s$ )、この問いで計算した値を  $\rho_{\infty}$ 、また Part A で求めた抵抗を  $R_{\infty}$  と呼ぶことにする。 0.3pt

## Part C. 異なる試料サイズでの測定 (3.2 点)

これまでは、試料が有限の大きさ  $w$  と  $l$  を持つことは考慮してこなかった。試料が小さくなれば、電圧が同じでも電流値は減少する。図の二つの端子（白丸）に電圧をかけると、電流は図に曲線で示したような（互いに交差しない）あらゆる経路を流れる。経路が長いほど、電流は小さいことを、図では線の太さで表現している。図 (b) のように小さな試料に同じ電圧をかけた場合、電流の経路の数が減るので、試料を流れる全電流は小さくなる。すなわち、抵抗が大きくなる。



一方、面抵抗率は、試料の大きさには依存しない。すなわち、測定した抵抗値から式 (3) によって面抵抗率を求める際には、補正係数  $f(w/s)$  を導入する必要がある：

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)} \quad (4)$$

試料の長さが  $l \gg s$  であるとき、係数  $f$  は比  $w/s$  のみに依存し、1 より大きい。すなわち  $f(w/s) \geq 1$  である。簡単化のため、我々は試料は十分に長いものとし、幅  $w$  への依存性のみを扱うことにする。そして、十分に幅が大きな試料の場合には、正しい結果  $\rho_{\square}$  に近づくと仮定する。つまり、

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{with} \quad f(w/s \rightarrow \infty) \rightarrow 1.0. \quad (5)$$

**C.1** 四端子法を用い、抵抗  $R(w, s)$  を、0.3 から 5.0 の間の 4 つの  $w/s$  において測定し、結果を表 C.1 に記せ。常に試料の長さが端子間隔の 5 倍以上、すなわち  $l > 5s$  であるようにせよ。また、試料の長さ  $l$  は、常に紙の同じ（長い）方向に沿うようにせよ。  
 $w/s$  の各々の値について、電圧を 4 つの異なる電流で測定し、その 4 つの値から抵抗の平均値  $R(w/s)$  を求めよ。結果を表 C.1 に記入せよ。 3.0pt

**C.2** 測定の各々について、 $f(w/s)$  を求めよ。 0.2pt

## Part D. 形状補正係数とスケール則 (1.9 点)

Part C では、抵抗値が試料の幅と端子の距離の比率  $w/s$  とともに変化することがわかった。Part C で得たデータを表す関数として、次のものを用いることにする：

$$\text{データを表す関数} \quad f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

$w/s$  が非常に大きい場合、 $f(w/s)$  は 1.0 にならねばならないことに注意せよ。

**D.1** Part C で得られたデータを、式 (6) の曲線でフィッティングするため、最も適切なグラフ用紙 (方眼紙**グラフ D.1a**, 片対数**グラフ D.1b**, または両対数**グラフ D1.c**) を選択し、データをプロットせよ。 1.0pt

**D.2** 前問のグラフのフィッティングにより、パラメータ  $a$  と  $b$  を求めよ。 0.9pt

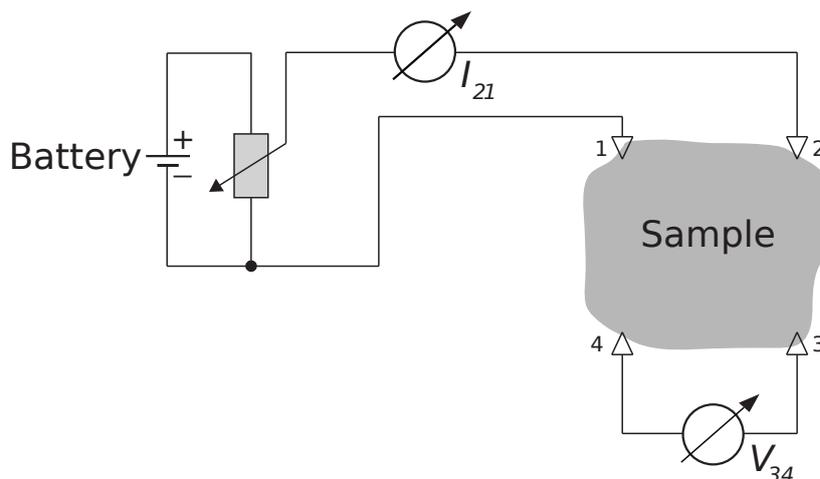
## Part E. シリコンウェハと van der Pauw 法 (3.4 点)

半導体や金属薄膜の電気抵抗（ないしは面抵抗）はデバイスの性質を決定づけるものであり、その測定は半導体産業において非常に重要である。以下の課題では、シリコンウェハを用いる。ウェハの光沢面には、クロム金属を非常に薄く付けてある。

ウェハの容器を開けて（RELEASE の矢印の向きに回す）、ウェハを取り出しなさい。ウェハを落としたり破損しないように気を付けなさい。また、光沢面に触れたり引っかいたりしないこと。測定では、光沢面が上を向くように机に置きなさい。

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>E.1</b> | 以前と同じ四端子セットアップを用い、電圧 $V$ を電流 $I$ の関数として求めよ。解答用紙に、使用しているウェハの番号を書き込め。番号は、プラスチック製のウェハの枠に書いてある。   | 0.4pt |
| <b>E.2</b> | データを <b>グラフ E.2</b> にプロットし、抵抗 $R_{4PP}$ を求めよ。   | 0.4pt |
| <b>E.3</b> | ウェハのような円形の試料についての補正を求めるため、試料の実効的な幅 $w$ をウェハの直径 $D = 100 \text{ mm}$ で近似する。この仮定を用いて比 $w/s$ を計算せよ。式 (6) の関数と、以前決めた二つのパラメータ $a$ と $b$ から、補正係数 $f(w/s)$ を求めよ。 | 0.2pt |
| <b>E.4</b> | 式 (4) を用いてクロム膜の面抵抗率 $\rho_{\square}$ を求めよ。  | 0.1pt |

形状補正なしに面抵抗率を求めるため、フィリップス社の技術者 L.J. van der Pauw は、簡単な測定法を開発した。すなわち、任意の形状の試料の縁に、以下の図に示すように4つの端子（1～4）を取り付ける。電流を、隣接する2つの端子間（たとえば1と2）に流し、端子3と4の間で電圧を測定する。この測定で得られた抵抗を  $R_{I,V} = R_{21,34}$  と書く。（図中の単語の訳: Sample= 試料、Battery= 電源）



対称性より  $R_{21,34} = R_{34,21}$  かつ  $R_{14,23} = R_{23,14}$  である。Van der Pauw は、（穴が空いていない）任意の形状の試料と点状の接点の場合は、次の式が成り立つことを示した：

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \quad (7)$$

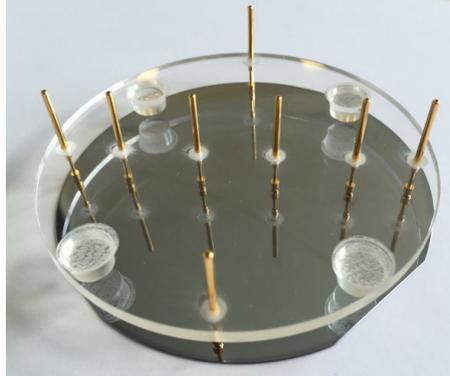


図 3：金属コーティングされたシリコンウェハの上に四端子装置を置いた様子。円形のウェハの右側がまっすぐに切り落としてあることに注意。以下では、この部分をフラットと呼ぶ。

測定点が正方形になるように、4つの電極の各々にワニ口クリップを接続せよ。そのうち、隣り合った二つを電流計を通して電流源に接続し、残りの二つを電圧計に接続せよ。電極の正方形を回転して、その一辺が、ウェハのフラットと平行になるようにせよ。

**E.5** 電流を流す電極と、ウェハのフラットの相対位置が分かるように図示せよ。電流値  $I$  を等間隔で6つ以上とって電圧  $V$  を測定し、結果を表 E.5 に記入せよ。 0.6pt

**E.6** 今度は電流を流す二つの電極がフラットに垂直になるようにして、上の測定を繰り返せ。結果を表 E.6 に記入せよ。 0.6pt

**E.7** E.5 と E.6 の実験ごとに異なる色・記号を用い、全てのデータを一枚のグラフ E.7 に表示せよ。二つの曲線から、平均値  $\langle R \rangle$  を求めよ。 0.5pt

**E.8** 式 (8) のすべての抵抗値  $R_{kl,mn}$  を  $\langle R \rangle$  で置き換えた上で式 (7) を  $\rho_{\square}$  について解き、クロム薄膜の面抵抗率  $\rho_{\square}$  を計算せよ。 0.4pt

**E.9** 電極を一直線にした場合 (課題 E.4) の結果と、van der Pauw 法 (課題 E.8) の結果を比較せよ。両者の測定の差を、相対誤差としてパーセント表示せよ。 0.1pt

**E.10** クロム (Cr) の膜の厚さの公称値は  $8 \text{ nm}$  である。この値と、van der Pauw 法の最終結果を用い、式 (1) と (2) を利用して、クロムの抵抗率を計算せよ。 0.1pt