

# シリコンウェハの抵抗率と最適電流

山下正人

(1996年10月17日受理)

## The Relationship between the Resistivity of Silicon Wafer and the Optimum Current

Masato YAMASHITA

キーワード : シリコン, 抵抗率, 最適電流, 四探針法

Key words : Silicon, Resistivity, Optimum current, Four-point probe method

### 1. まえがき

比抵抗法 (Resistivity method) は、地下に電流を流して大地の電気伝導度を測定し、銅、鉛、亜鉛等の非鉄金属鉱床を探索するために考案された方法である。これが後に半導体に応用され、四探針法 (Four-point probe method) と呼ばれるようになった。四探針法は、互いに絶縁された四本の金属針 (探針) を直線的に等間隔に配置したプローブを用い、外側の二本の探針 (電流探針) 間に電流を流したとき、内側の二本の探針 (電圧探針) 間に生ずる電圧降下を測定して抵抗率を求める方法である。現在、四探針法は測定器の開発と相まって、半導体以外の材料に対しても広く応用されるようになってきた。

測定時に電流探針に流す電流は、抵抗率を正確に測定するための重要なファクタの一つである。

Table 1 は ASTM<sup>1)</sup> F84-88 に掲載されている表で、シリコンウェハの抵抗率を四探針法で測定するときに流す電流を規定したものである。この場合各抵抗率に対する電流は、電圧探針間の電圧が10mV になるように定められている。また、Table 2 は JIS<sup>2)</sup> H 0602 に規定されている電流で、同じくシリコンウェハに適用される。この場合は、電圧探針間の電圧が33mV 以下になるように電流が決められている。

Table 1 Recommended Nominal Measurement Current Values

Resistivity( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Current
<0.03	100 mA
0.03 to 0.3	25 mA
0.3 to 3	2.5 mA
3 to 30	250 $\mu\text{A}$
30 to 300	25 $\mu\text{A}$
300 to 3000	2.5 $\mu\text{A}$
>3000	0.25 $\mu\text{A}$

Table 2 単結晶及びウェハの抵抗率と測定電流

抵抗率 $\Omega \cdot \text{cm}$	電流
0.075 以下	100 mA
0.075 を越え 0.75 以下	10 mA
0.75 を越え 7.5 以下	1 mA
7.5 を越え 75 以下	100 $\mu\text{A}$
75 を越え 750 以下	10 $\mu\text{A}$
750 を越え 2000 以下	1 $\mu\text{A}$
2000 を越えるとき	0.1 $\mu\text{A}$

いずれの場合も抵抗率が一桁大きく（小さく）なると、電流が一桁小さく（大きく）なるというふうに、いわば機械的な決め方になっている。

抵抗率と電流の問題は重要であるにも拘わらず論文はほとんど見あたらない。そこで電流と抵抗率の関係を調べるために、抵抗率の異なるシリコンウェハと探針の先端の直径が異なるプローブを用いて実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2-1. 測定システム

プローブはスタンドに取り付けられ、探針を試料に圧着したり離したりできるようになっている。電流探針には、直流電源（Keithley 220）から電流が供給される。電圧探針間の電圧降下は電圧計（Keithley 181）で測定した。電圧計は入力抵抗が非常に大きいので、試料を流れる電流のうち電圧計に流れ込む電流は無視してもよい。また電圧計の端子から試料に向かって流れだすオフセット電流は数pAのオーダーであるので、試料と電圧探針との接触面で生ずる電圧降下は無視できる程度に小さい。したがって、電圧探針間で測定される電圧降下は、ほぼ試料内部での電圧降下と考えてよい。この点が、抵抗率測定方法の中でも四探針法が最も信頼できる方法として、半導体産業界で広く用いられている理由である。

直流電源と電圧計の制御、抵抗の算出及び結果の出力はパソコンが行う。外部からのノイズの影響をできるだけ抑えるために、探針と試料を静電シールドした箱の中に入れて測定した。また探針、

パソコン、測定器を接続するケーブル類も静電シールドした。

### 2-2. 試料

測定に用いた試料は三菱マテリアル製のシリコンウェハで、その詳細を Table 3 に示す。製法の欄にある CZ はチョクラルスキー（Czochralski）法または引き上げ法と呼ばれている結晶成長法で、原料をるつぼ（グラファイト、アルミナ、石英、白金など）の中に入れて、融点より僅かに高温の熔融状態に保ち、上方から種子単結晶を下ろし融液の上端に触れさせよくなじませた後、徐々に種子単結晶を回転させながら引き上げて、種子単結晶と同じ結晶方位をもった単結晶を成長する方法である。また、FZ は浮遊帯熔融（floating zone）法と呼ばれる結晶成長法で、多結晶シリコンのインゴットの両端を固定し、その一端から他端に向かって高周波コイルによる誘導加熱を行うと無転位の単結晶シリコンが成長する。この方法は各種の高融点金属の精製や酸素含有量の少ないシリコン単結晶を作製する場合にも用いられている。

### 2-3. プローブ

測定には K & S 社製の四探針プローブを用いた。探針の材料はタングステンカーバイドで、その先端は半球状に加工されている。先端の直径が 8mil (203 μm)、4 mil (102 μm) および 1.6 mil (41 μm) の 3 種類である。プローブの重量はいずれも 100g である。

## 3. 実験結果および考察

プローブを試料の中心に置き、電流探針に流す

Table 3 測定に用いられたシリコンウェハ

型	試料名	抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	直径 (mm)	厚さ ( $\mu\text{m}$ )	製法	軸	不純物
N	N1	$8.98 \times 10^2$	62.0~64.0	190~210	FZ	<111>	P
N	N2	$4.18 \times 10^1$	124.5~125.5	610~640	CZ	<100>	P
N	N3	$8.15 \times 10^{-1}$	99.5~100.5	485~515	CZ	<100>	P
N	N4	$1.38 \times 10^{-2}$	75.0~77.0	475~525	CZ	<100>	Sb
P	P3	1.59	100.0 $\pm$ 1.0	475.0 $\pm$ 25.0	CZ	<100>	B
P	P4	$1.70 \times 10^{-2}$	149.5~150.5	610~640	CZ	<100>	B

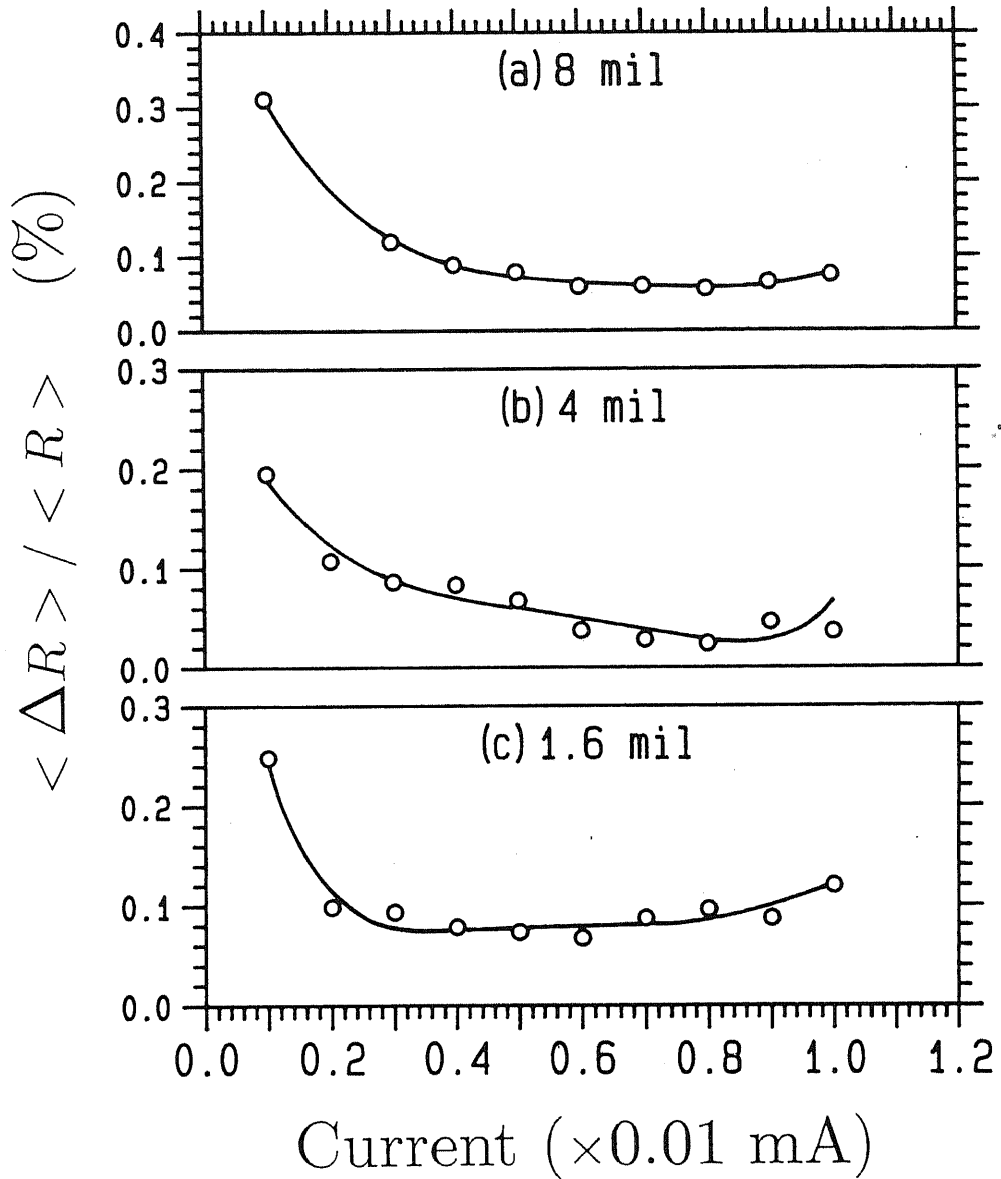


Fig. 1 (a) 試料 N1 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。

電流の大きさを変えて電圧探針間の電圧を測定した。試料に流す電流は Table 2 の JIS H 0602 「シリコン単結晶ウェハの 4 探針法による抵抗率測定方法」に規定されている電流に準拠して選定した。ある一定の電流を流しながら、一定の時間間隔で 25 回の電圧の測定を行う。この測定により 25 個の抵抗値  $R$  が電圧と電流の比 ( $V/I$ ) として求めら

れるが、これらの抵抗値を測定開始時から順番に 5 個の抵抗値からなる 5 つのグループに分け、各グループの抵抗値の最大値と最小値の差  $\Delta R_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) を求める。さらに、これらの平均値  $\langle \Delta R \rangle$  を求める。また、25 個の抵抗値の平均値を  $\langle R \rangle$  とする。

Fig. 1 (a)-(f) は各試料の  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  (%)

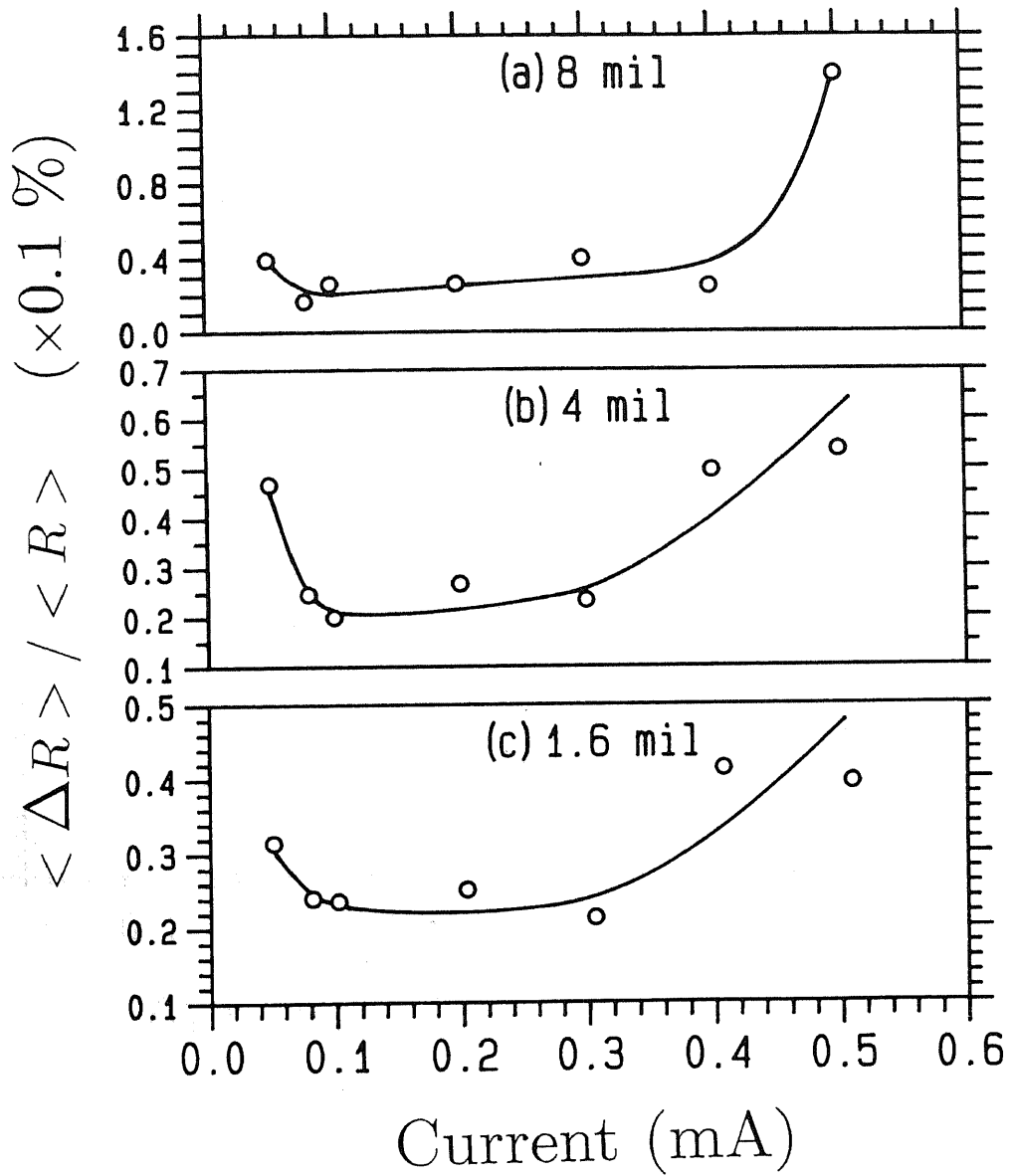


Fig. 1 (b) 試料 N2 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。

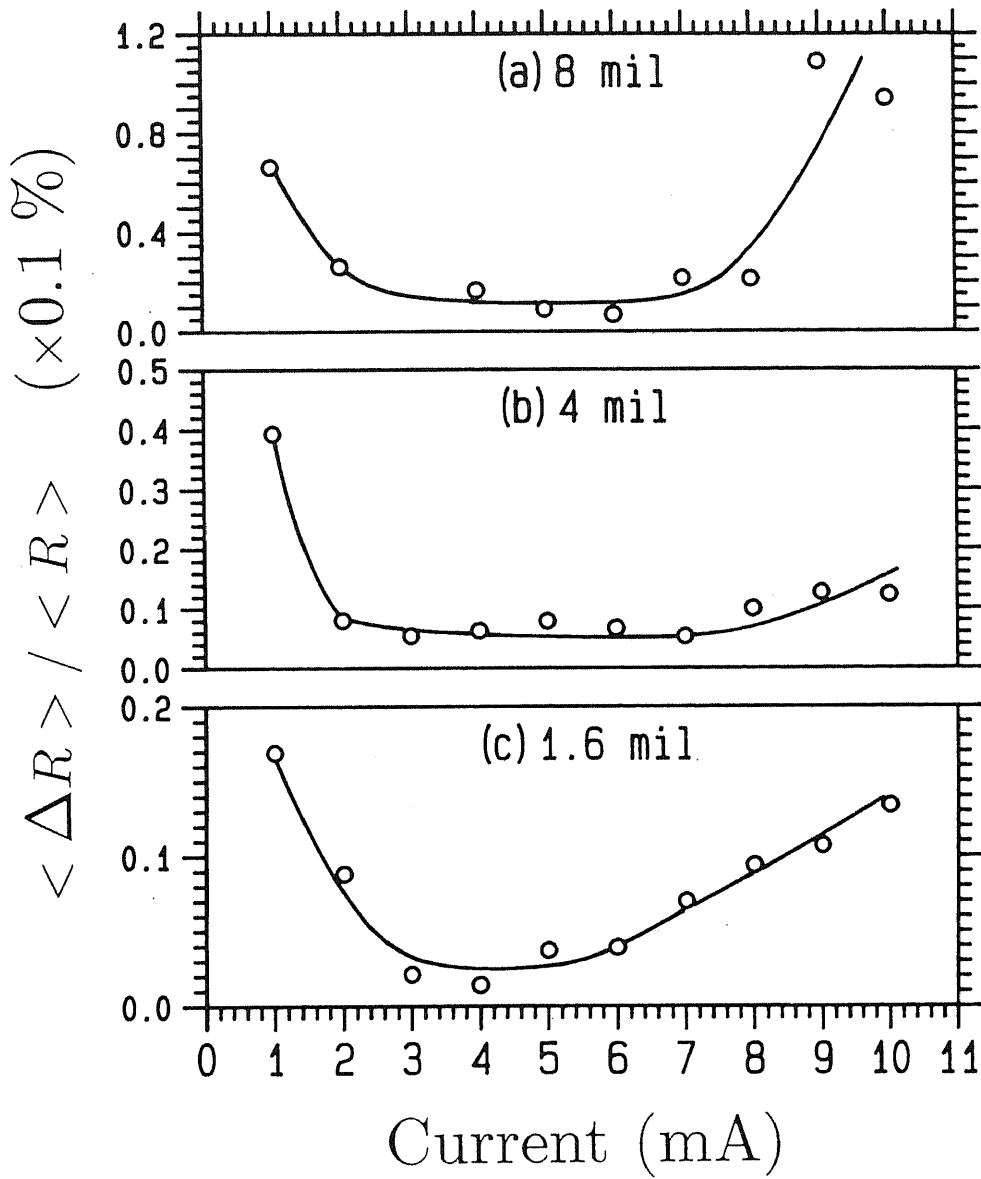


Fig. 1 (c) 試料 N3 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。

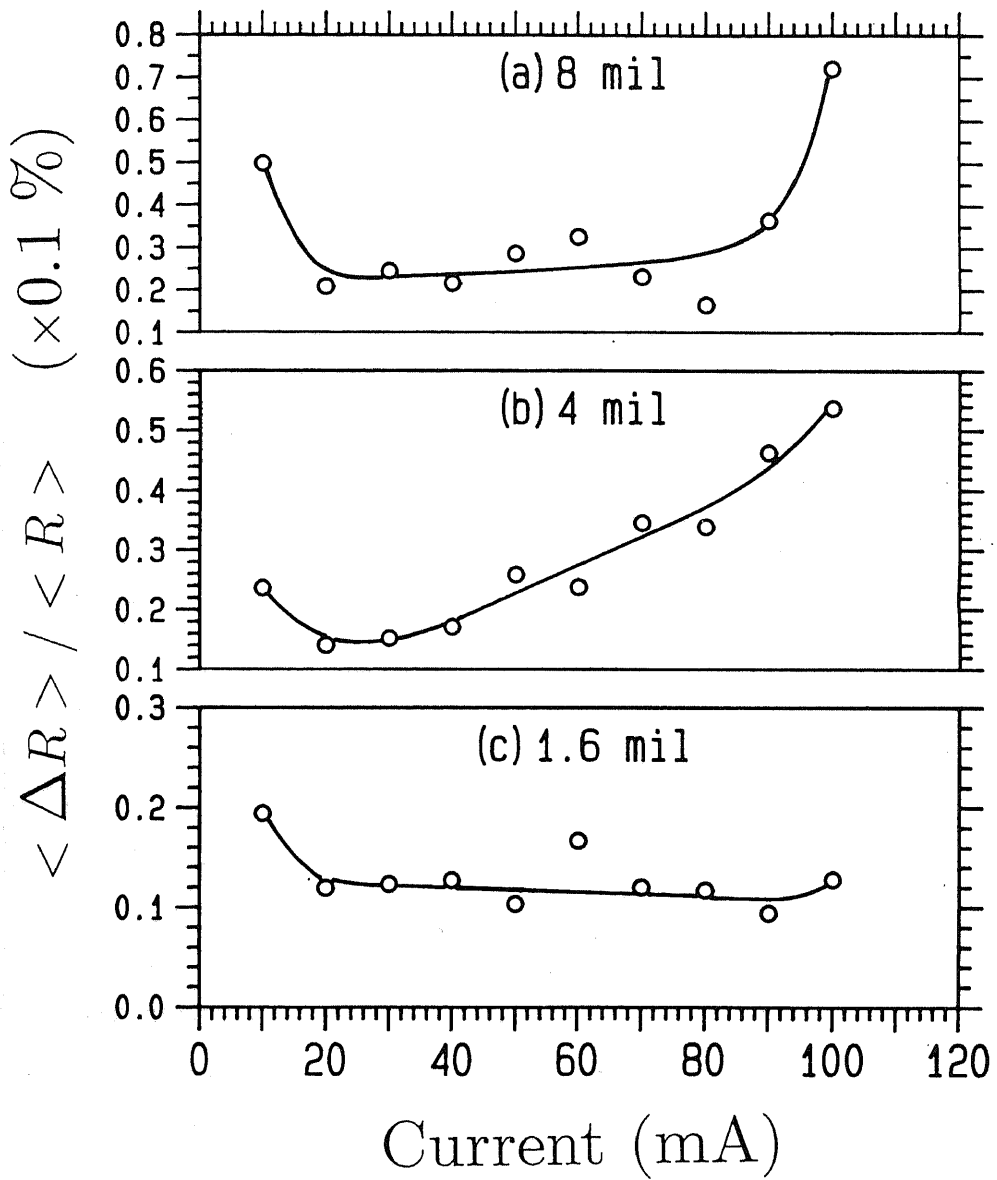


Fig. 1 (d) 試料 N4 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。

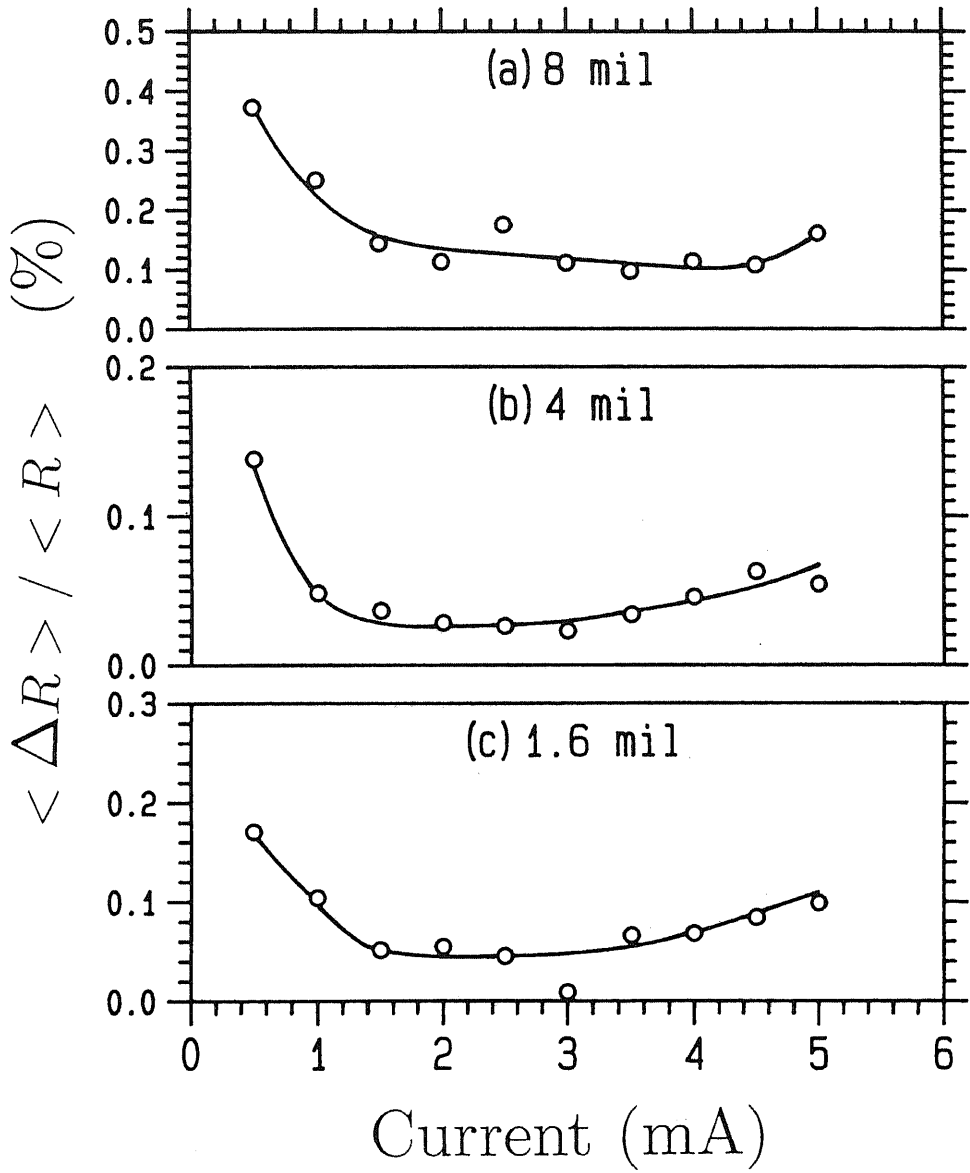


Fig. 1 (e) 試料 P3 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。

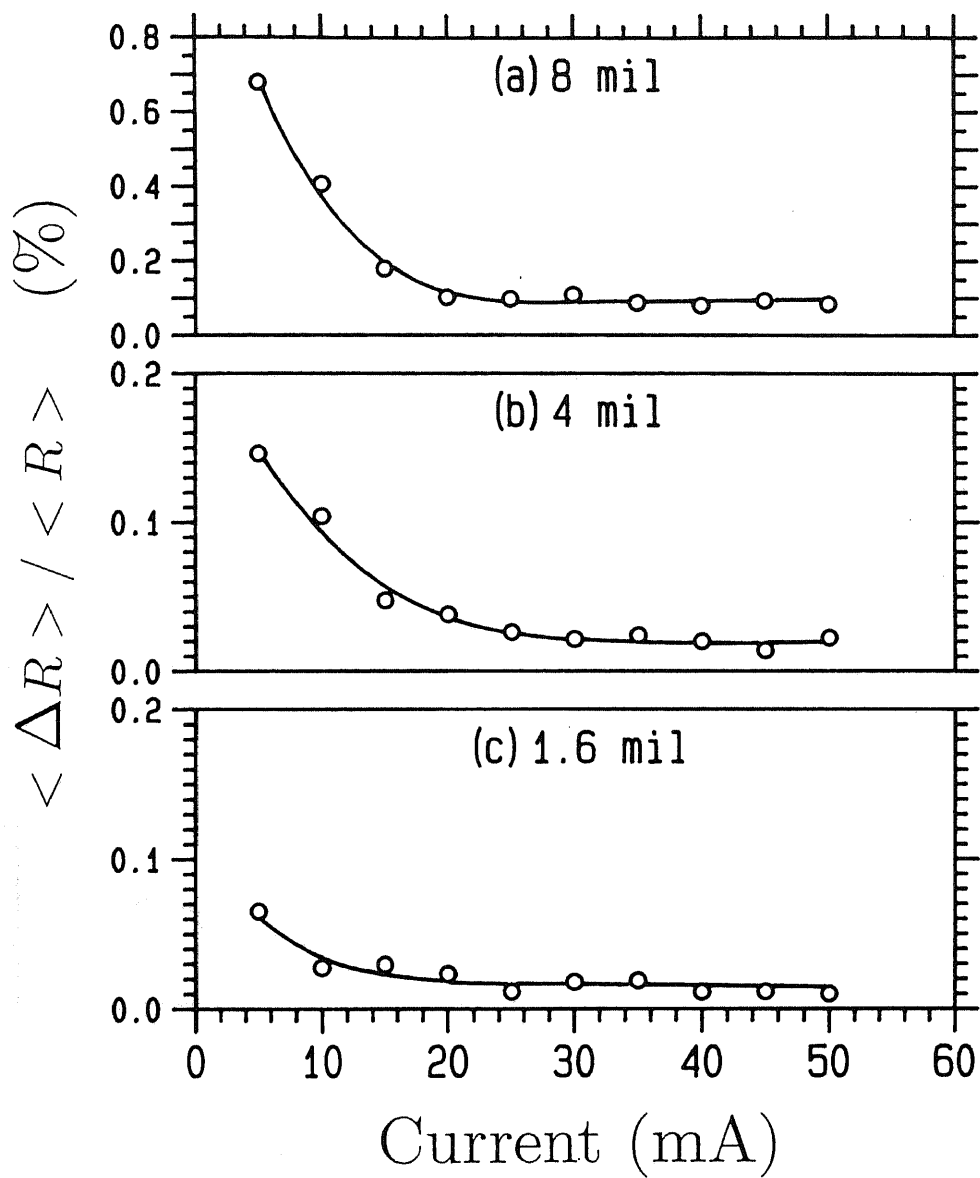


Fig. 1 (f) 試料 P4 の電流と  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  の関係。上から順に探針の先端直径は 8 mil, 4 mil, 1.6 mil である。



を電流の関数として示したもので、上から探針の先端直径が (a) 8 mil, (b) 4 mil および (c) 1.6 mil の場合である。いずれの場合も電流が小さくなるにつれて  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  が大きくなる。また、電流が大きくなる場合も、Fig. 1 (f) を除き  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  が大きくなる。この特徴は探針の先端直径やシリコンのタイプ (N, P) に関係なく見られる。これらの結果から、電流が小さ過ぎても大き過ぎても測定が不安定になることがわかる。

実験に使用したシリコンウェハの表面はミラー研磨されていて非常に平坦であるが、探針の先端を顕微鏡で見ると決して滑らかとは言えない形状をしている。したがって、探針をシリコンウェハに接触させたといっても、微視的には両者は幾つかの点で接触しているにすぎない。シリコンウェハの自然酸化膜は、厚くてもせいぜい 20~30 Å 程度である。このように酸化膜が薄いと、電流はトンネル効果によって流れる。自然酸化膜の場合、膜の厚さは必ずしも一様ではないので、ある接点ではトンネル電流が流れる条件が満たされていても、他の接点では満たされていないということもあり得る。電圧を下げる (電流を小さくする) につれてトンネル電流が流れる接点の数は少なくなる。その結果、集中抵抗が大きくなり電流の流れが不安定になるものと考えられる。また測定信号が小さくなればなるほど、測定器自体から発するノイズや外部からのノイズが目立ってくる。このようなわけで、低電流領域で測定が不安定になるのは避けられない。

シリコンウェハの酸化膜は一般に半導体の性質を示すので、電流と電圧は必ずしもオームの法則に従わない。Fig. 2 は接触部の電圧-電流特性の代表的なパターンを示したもので、曲線 I と II が接触部に酸化膜が介在している場合であり、曲線 III は酸化膜が存在しない場合である。<sup>3)</sup> この図から電圧が大きい領域で電流が大きく変動する可能性があることがわかる。測定中にこのように電流が変動すれば、電圧探針間の電圧降下も当然変動することになる。また、ジュール熱による試料の温度上昇や少数キャリアの注入なども考慮しなければならない。高電流領域ではこれらの不安定要素が複雑に絡み合っ、測定を不安定にしてい

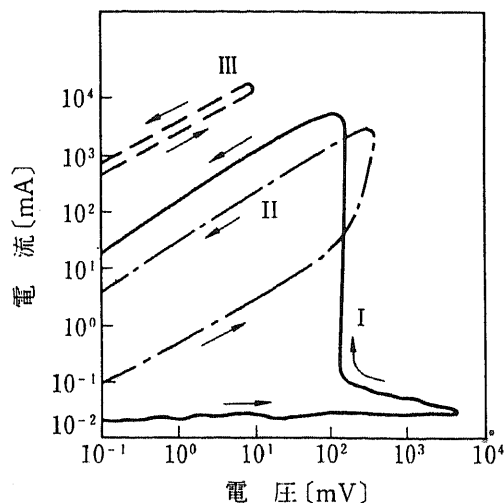


Fig. 2 半導体-金属接触の代表的な電流-電圧特性。曲線 I, II は接触面に酸化膜が介在する場合で、Iの方がIIよりも酸化膜の厚さが厚い場合である。曲線IIIは酸化膜が介在しない清浄な面同志の接触の場合である。

るものと考えられる。以上のような理由から、シリコンウェハの抵抗率を正確に測定するためには、その抵抗率にふさわしい電流を流さなければならない。

また、この結果から探針の先端直径が小さい方が安定な測定が行える傾向があることがわかる。これは探針と試料を接触させたとき、先端が細いほどシリコン表面の酸化膜が破壊されやすく、それだけシリコンと探針とが広い面積で確実に接触し、電流が安定に流れるためと考えられる。

$\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  が平坦な範囲内の電流であれば安定な抵抗率の測定が可能なのであるが、余裕をみてその範囲の中央値を最適電流として定義することにする。Fig. 1 (f) の場合、今回の測定電流の範囲では電流が大きくなっても  $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  が増加する傾向が見られないので、最適電流の範囲を定めることはできないが、便宜上次のようにして求めた。Fig. 1 (a) から (e) の場合、 $\langle \Delta R \rangle / \langle R \rangle$  が平坦な範囲の上限は下限の平均 3.2倍になっている。そこで、Fig. 1 (f) の場合の下限 20mA の 3.2倍すなわち 64mA を上限とし、これらの中央値 42mA を最適電流とした。

Fig. 3 は以上のようにして求めた最適電流と

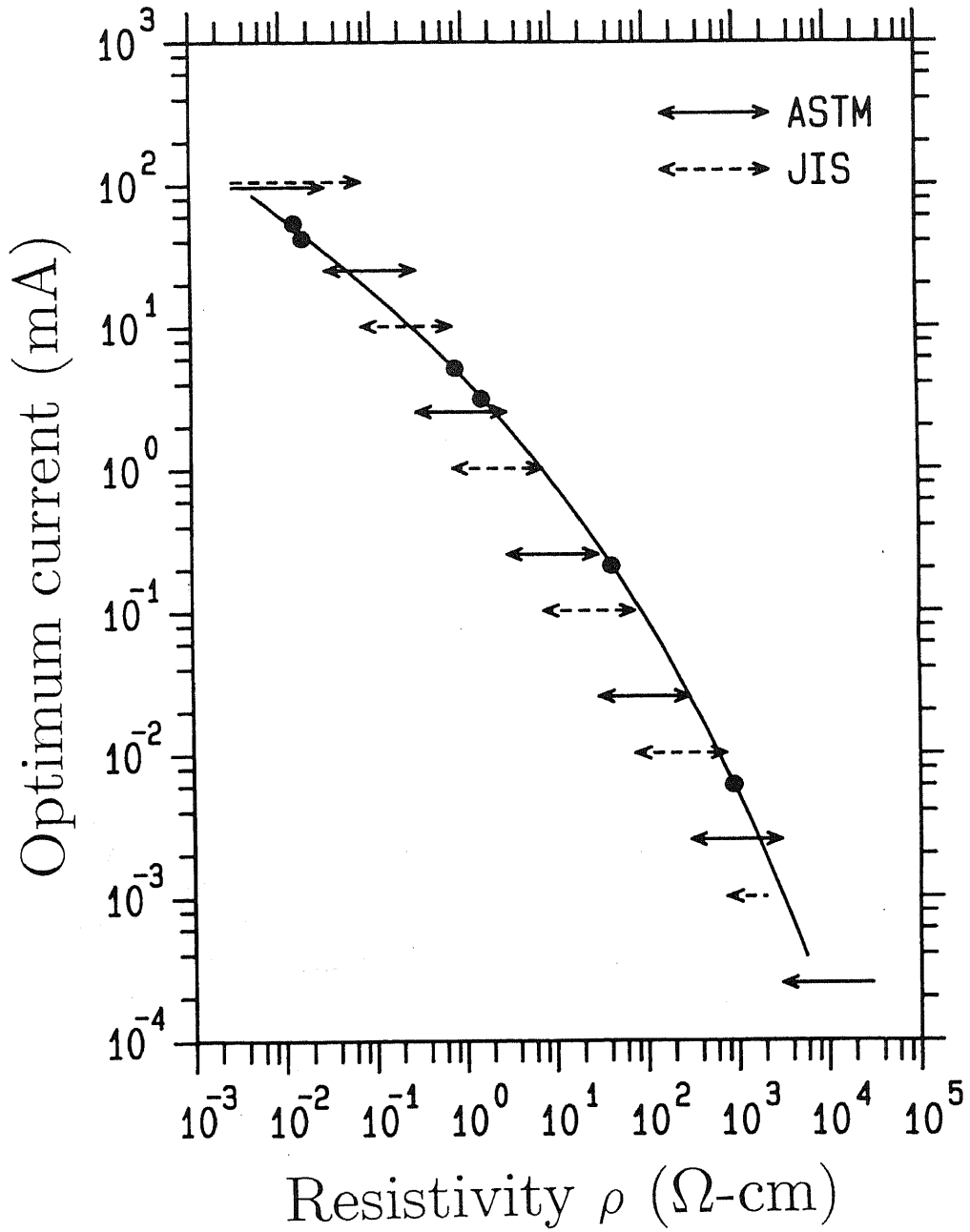


Fig. 3 シリコンウェハの抵抗率と最適電流の関係。ASTM F84-88 とJIS H 0602 に規定されている電流範囲が矢印で示されている。

シリコンウェハの抵抗率  $\rho$  との関係を示したものである。抵抗率は  $\rho = FtV/I$  から求めた。ここで、 $F$  は抵抗率補正係数で、 $t$  はシリコンウェハの厚さである。<sup>4-6)</sup> 参考のために ASTM F84-88 と JIS H 0602 に規定されている測定電流の範囲も示した。ただし、電流が 100mA のところは ASTM と JIS のデータが重なるので、見やすくするために少し間隔をあけて示した。この測定結果では、ASTM や JIS のように必ずしも直線的な関係にはなっていないことがわかる。すなわち ASTM と JIS の測定電流は  $\rho = 2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  から  $\rho = 0.2 \Omega \cdot \text{cm}$  の間は大き目に設定されているし、 $\rho = 0.6 \Omega \cdot \text{cm}$  から  $\rho = 1.5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  の間はかなり小さ目に設定されている。

1317.

- 6) M.Yamashita, Sh.Yamaguchi, T.Nishii, H.Kurihara and H.Enjoji : Jpn.J.Appl. Phys.28 (1989) 949.

#### 4. むすび

四探針法によって抵抗率を測定する際、電流探針に流す電流の大きさは、測定の正確さという観点から重要であるが、あんがい見逃されがちである。半導体の場合、種々の原因で抵抗率が変化するので特に注意する必要がある。今回異なる抵抗率をもつシリコンウェハを用いて、抵抗率と最適電流との関係を求めた。その結果、必ずしも ASTM や JIS に規定されているような直線関係になっていないことが確かめられた。今後、この結果をもとにして最適電流を設定し測定を行えば、より正確な抵抗率が求められるものと思われる。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多大の助力をいただいた労働省の城井裕司、(株)ダイアインストルメンツの西井俊文および栗原 浩の各氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) American Society for Testing Materials
- 2) Japanese Industrial Standards
- 3) 玉井輝雄：図解による半導体デバイスの基礎 (コロナ社).
- 4) M.Yamashita : Jpn.J.Appl.Phys.26 (1987) 1550.
- 5) M.Yamashita : Jpn.J.Appl.Phys.27 (1988)