

円形半導体ウェーハの抵抗率非接触測定法

後 藤 み き

On the Contactless Measurement of Electric Conductivity of Semiconductor Circular Wafer

Miki Goto

Abstract

The geometrical factor for the impedance of coil is measured, varying the radius of semiconductor wafer, b and of coil, a and the distance between coil and semiconductor wafer.

Theoretical values of the geometrical factor agree with the measured ones for the size ratio, $a/b \leq 0.8$.

1. ま え が き

円形半導体ウェーハの抵抗率非接触測定法を電磁理論より導くことにより形状係数を明らかにし¹⁾, 従来の測定方法より簡単に測定できるベクトル・インピーダンス・メーター（以下 $V \cdot I$ ・メーターと称する）と、1個のコイルを用いた測定について報告してきたが^{2,3)}, 他の寸法に比べ十分小さいコイルという理論解析の際の条件により、コイル半径 a はウェーハ半径 b に対し $a \leq b/7.3$ という関係のコイル寸法で実験実証を行ってきた。その際形状係数の実証については不十分だったため、今回は、コイルの寸法を大きくすることによって、形状係数の実証を行った。またコイルの大型化に共い測定精度の向上が得られたので以下に報告する。

表 1. ウェーハの抵抗率と寸法

| Wafer No. | ρ [Ω cm] | b [mm] | t [mm] |
|-----------|--------------------------|-------------|-------------|
| 1 | 0.0154 | 38.75 | 2.02 |
| 2 | 0.030 | 25.95 | 1.98 |
| 3 | 0.047 | 25.93 | 2.13 |
| 4 | 0.068 | 25.73 | 2.14 |

表 2. コイルの寸法

半径 $a=13.18$ mm, 導線の径 $\phi=0.8$ mm

| Coil No. | n [turn] | l [mm] | $2a/l$ |
|----------|---------------|-------------|--------|
| 1 | 18 | 17.9 | 1.472 |
| 2 | 29.3 | 27.2 | 0.969 |
| 3 | 38 | 34.9 | 0.755 |
| 4 | 75 | 66.1 | 0.399 |
| 5 | 103 | 92.9 | 0.284 |
| 6 | 144 | 133.1 | 0.198 |

表 3. コイルの寸法

$2a/l \approx 1$

| Coil No. | a [mm] | n [turn] | l [mm] | ϕ [mm] |
|----------|-------------|---------------|-------------|----------------|
| 7 | 5.00 | 9 | 10.0 | 1.0 |
| 8 | 9.60 | 22 | 20.2 | 0.8 |
| 9 | 10.20 | 30 | 20.3 | 0.6 |
| 10 | 12.85 | 38 | 25.6 | 0.6 |
| 11 | 15.00 | 44 | 29.7 | 0.6 |
| 12 | 16.55 | 29 | 32.2 | 1.0 |
| 13 | 16.60 | 36 | 32.8 | 0.8 |
| 14 | 16.65 | 50 | 33.6 | 0.6 |
| 15 | 19.80 | 44 | 40.0 | 0.8 |

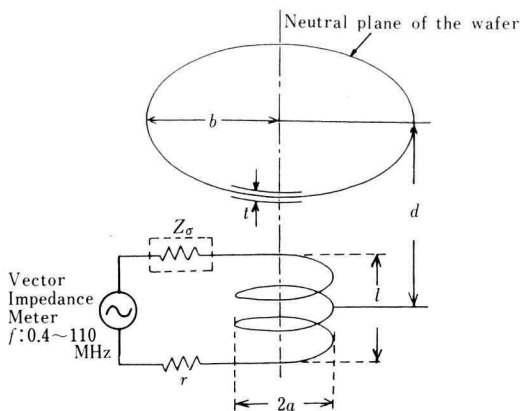


Fig. 1. Schematic diagram of contactless measurement method of σ .

Formula

$$Z_{\sigma} = \frac{\pi^3}{8} f^2 \mu_0^2 \sigma a^4 n^2 t \frac{b^4}{d^2(d^2 + b^2)^2} [\Omega] \quad (1)$$

$$Z = Z_L + Z_{\sigma} = \pi^2 f \mu_0 a n^2 \left\{ j 2 \frac{K a}{l} + \frac{\pi}{8} f \mu_0 \sigma a^3 t \frac{b^4}{d^2(d^2 + b^2)^2} \right\} + r [\Omega] \quad (2)$$

Z_{σ} is values of the change of input impedance of the vector impedance meter when semiconductor circular wafer of conductivity σ approached to the coil.

$Z[\Omega]$: the measured value by V.I. meter

$Z_L[\Omega]$: impedance of coil

$f[\text{MHz}]$: frequency

$\mu_0[\text{H/m}]$: permeability

$a[\text{m}]$: radius of coil

$n[\text{turn}]$: number of turns of coil

$t[\text{m}]$: thickness of wafer

$b[\text{m}]$: radius of wafer

$d[\text{m}]$: distance between wafer and coil

K : nagaoka's constant

$l[\text{m}]$: length of coil

$r[\Omega]$: resistance of coil

$\sigma[\text{S/m}]$: conductivity of semiconductor

2. コイルの寸法

2.1 コイルの大型化

測定方法の概略図を Fig. 1 に示す。V・I・メーターによって測定されるインピーダンスを Z 、コイル自身のインピーダンスを Z_L としたとき、半導体ウェーハによる入力インピーダンスの変化 Z_{σ} は $Z - Z_L$ で算出するため、測定精度を上げるには $Z_L \ll Z_{\sigma}$ ($Z \approx Z_{\sigma}$) となるようにしたい。そこで式 (2) の $\{ \}$ 内で「第一項」<「第二項」とするにはコイル半径 a を大きくし

て、長岡係数 K を小さくしなければならない。しかし理論解析の際、コイルを磁気双極子能率をもつ磁気双極子として、つまり十分小さいコイルという仮定において式 (1) を導いたので、コイル半径 a は他の寸法に比べてそれ程大きくはできない。そこで式 (1) より求めた理論値 Z_{σ} と実験値 Z'_{σ} が一致するコイル半径 a とはどの程度なのかコイルの寸法 ($a, n, \phi, l \approx n\phi$) を色々変えて実験を行った。その結果、表 2 に示すコイルについて $2a/l$ 対 Z'_{σ}/Z_{σ} は Fig. 2 に示す傾向を示し、 $Z'_{\sigma}/Z_{\sigma} = 1$ の点は $2a/l = 1$ の付近に集中した。そこで、式 (2) に $2a/l = 1$ に対する長岡係数 $K = 0.688$ を代入すると式 (2) の $\{ \}$ 内について $0.688 < [\text{第二項}]$ となる条件は容易に与えられる。例えば表 1, 3 に示すウェーハ No. 1, コイル No. 15, $f = 0.9 \text{ MHz}$ ウェーハとコイルの中心間距離の最小 $d_{\min} = l/2 + t/2$ の場合、 $[\text{第二項}]$ の値は 61.18 となり 3 桁目以降の減算となる。以上のことから 3 桁表示の V・I・メーターを用いて測定しているので式 (2) の各パラメーターの設定をうまく選べば 3 桁精度が得られる。

Fig. 3 に抵抗率 $0.03 \Omega \text{ cm}$ のウェーハを用いた $2a/l \approx 1$ の条件での各コイルサイズにおける周波数 f に関しての入力インピーダンスの変化 Z_{σ} の実験結果を示した。コイル寸法 (a, l) を大きくすると周波数の低いところでの測定精度が増す反面、周波数の高いところではコイルの寸法による影響（理論値よりも実験値が大きくなる傾向を示す）の方がウェーハの表皮効果による影響（理論値より実験値が下がる傾向を示す）よりも大きく現われている。Fig. 3 のコイル No. 15 にお

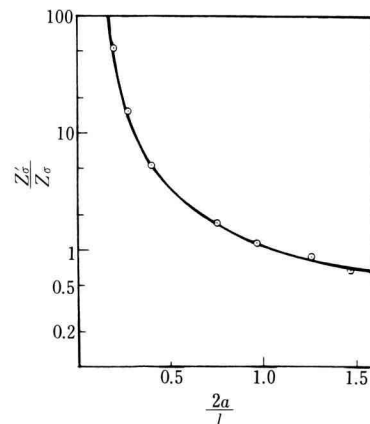


Fig. 2. Relation between Z'_{σ}/Z_{σ} and $2a/l$ on wafer no. 3. cf. Table 1 and 2.

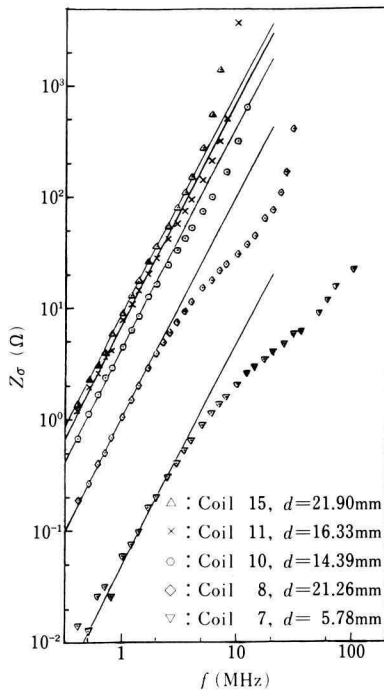


Fig. 3. Relation between the measured values of Z_σ and frequency f on wafer No. 2 when different sizes of coils with a condition that $2a/l=1$. Straight lines show the calculated values by equ. (1). Cf. Table 1 and 3.

ける $2 \leq f \leq 4$ MHz 範囲は、コイル寸法の影響とウェーハの表皮効果の影響が相殺しあっているものと考えられる。Fig. 3 より理論値と実験値の一致する周波数の上限を考えると実験系の寸法 R （長さの単位をもつ a, l, d, t 、特にここでは $\sqrt{(2\pi an)^2 + l^2} \approx 2\pi an$ ）と波長 λ の関係は $12R \leq \lambda$ が得られる。つまりコイルを大きくすると周波数の上限についての条件 $f \leq 1/\pi\mu_0\sigma(2t)^2$ に加えて³⁾

$$f < \frac{C}{12 \times 2\pi an} \quad (\because C = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s})$$

を考えなければならない。

2.2 形状係数の実証

抵抗率 $0.0154 \Omega \text{ cm}$ のウェーハについての各コイルサイズごとのウェーハとコイル中心間距離 d に対する実験結果を Fig. 4 に示した。理論値と一致する距離

変化の範囲は $d_{\min} = l/2 + t/l$ より $d_{\max} = d_{\min} + a$ までであり、その範囲はコイル半径と同程度であった。 d 対 Z_σ の測定における周波数設定については低い周波数の方が距離変化の広い範囲で理論値と一致するという結果を得た。

理論解析の際、距離 $d = b/\sqrt{2}$ の点で最大磁束が得られ測定精度が上がると思われたが、V・I・メーターの出力不足のためか Fig. 4 からは確認できないが、 $b/\sqrt{2} = d_{\min} = l/2 + t/l$ となるようなコイルにおいて Z_σ の周波数特性を測ると周波数 f の広い範囲で理論値と一致した測定結果を得られた (Fig. 5)。

Fig. 6 に形状係数 $B_a = b^4/d^2(d^2 + b^2)^2$ と d の関係を示した。今回の実験で使用したウェーハ半径は $b_2 = 26 \text{ mm}$ と $b_3 = 38 \text{ mm}$ であり、距離は $5 \leq d \leq 40 \text{ mm}$ の範囲で理論曲線と一致した。

ここで距離の最小 d_{\min} とコイルの寸法について考えてみると、 $d_{\min} = l/2 + t/l$ 、コイルの長さ $l = n\phi$ よりコイルの巻数 $n = (2d_{\min} - t)/\phi$ が得られ、

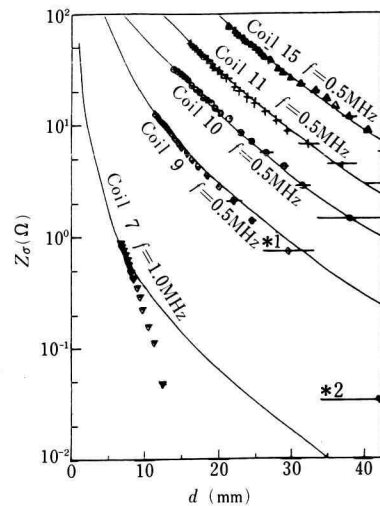


Fig. 4. Comparison between the calculated and measured values of Z_σ on distance d when different sizes of coils on wafer No. 1 were used. Curved lines show the calculated values by equ. (1). Cf. Table 1 and 3

Note: A big difference value between *1 and *2, corresponds to a change of minimum scale of V.I. meter for lack of accuracy (three figures) of it.

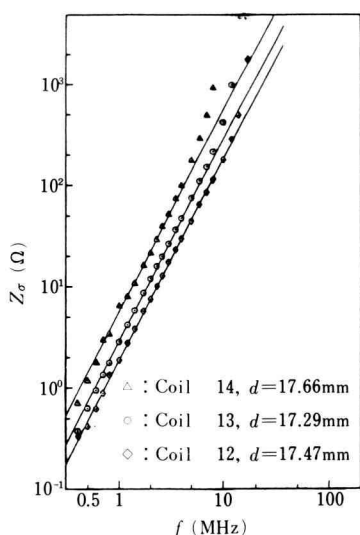


Fig. 5. Comparison between the calculated and measured values of Z_σ when $d \approx b/\sqrt{2} = 18.2$ mm on wafer No. 4. Cf. Table 1 and 3.

$$Z_\sigma(d_{\min}) \propto n^2 B_d(d_{\min})$$

$$= \frac{b^4}{\phi^2} \left\{ \frac{2d_{\min} - t}{d_{\min}(d_{\min}^2 + b^2)} \right\}^2$$

となる。従って Z_σ の最大値は $Z'_\sigma(d_{\min}) = 0$ より

$$-4d_{\min}^3 - 3td_{\min}^2 + tb^2 = 0 \quad (3)$$

の関係を満たす d_{\min} によって与えられる。今回の実験で使用したウェーハについて $b_2 \approx 26$ mm, $t \approx 2$ mm のものは $d_{\min} \approx 7.5$ mm であり, $b_3 \approx 38$ mm, $t \approx 2$ mm のものは $d_{\min} \approx 9.5$ mm となるコイルを使用すれば測定精度が得られると考えられるが, 実験結果からは, 式 (3) を満たす d_{\min} となるコイルより大きめの方が高い測定精度が得られた。

3. む す び

コイルの大型化によりコイルとウェーハの距離を広範囲に測定可能となり, 形状係数 $B_d = b^4/d^2(d^2 + b^2)^2$ の実証を行った。また周波数の低いところでの測定精度が上がることを明らかにした。

理論解析に用いた条件を実験結果より具体化した事項を表4にまとめた。更に, 測定周波数範囲 (コイルの導線抵抗 $r \approx 10 Z_\sigma$ となる f_{\min} より $f_{\max} = 1/$

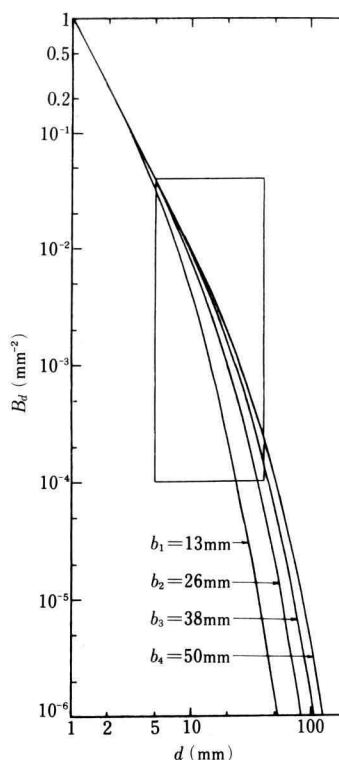


Fig. 6. Relation between $B_d (= b^4/d^2(d^2 + b^2)^2)$ and distance. A rectangle is area that was verified the theory by experimental, but on only two curves b_2 and b_3 .

表4. 理論解析の前提条件の具体化

| | 理論解析の前提条件 | 具体的検討 |
|---|---|-------------------------------------|
| 1 | ウェーハの厚み $t \ll \delta$ | $2t \leq \delta$ |
| 2 | 測定系の寸法 $R \ll \lambda$ | $12R \leq \lambda$ |
| 3 | 磁気双極子 $p_m = \mu_0 \pi a^2 n l$ と等価なコイル | $2a/l \approx 1$ and $a \leq b/1.3$ |

$\pi \mu_0 \sigma (2t)^2)^{3)}$ の検討およびコイルとウェーハの最小距離 d_{\min} の検討などから測定コイルの最適な形状を明らかにした。

謝 辞

本実験の遂行に当たり, 数々の御助言を頂いた元本学教授村上一郎先生ならびに三橋廣二先生に心から感謝

いたします。また実験に協力してくださった岩崎義典君，杉田康行君，村田弘隆君，牛尾徹君，岡元健一郎君，鈴木和彦君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) I. Murakami and M. Goto: "Theoretical Consideration on a Contactless Measuring Method of Electric Conductivity of Semiconductor Circular Wafer"; IECE Trans., E65, no. 8 August 1982.
- I. Murakami and M. Goto: "On the Contactless Measurement of Electric Conductivity of Semiconductor Circular Wafer I. Theoretical Consideration"; Research Reports of Ikutoku Tech. Univ. B-6 (1981).
- 2) I. Murakami and M. Goto: "Theoretical Considerations on another Contactless Measuring Methods of Electric Conductivity of Semiconductor Circular Wafer"; Research Report of Ikutoku Tech. Univ. B-7 (1982).
- 3) 後藤みき，村上一郎，三橋廣二: "円形半導体ウェーハの抵抗率非接触測定法"，幾徳工業大学研究報告，B-10 (1986)