

逆解析を利用しためっき膜厚のモニタリング

MONITORING OF ELECTROPLATING THICKNESS USING INVERSE ANALYSIS

阿部 馨督¹⁾, 天谷 賢治²⁾, 青木 繁³⁾

Keisuke ABE, Kenji AMAYA and Shigeru AOKI

- 1) 東京工業大学大学院情報理工学研究所 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: kabe@a.mei.titech.ac.jp)
2) 東京工業大学大学院情報理工学研究所 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: kamaya@a.mei.titech.ac.jp)
3) 東洋大学工学部 (〒 350-8585 川越市鯨井 2100, E-mail: saoki@eng.toyo.ac.jp)

An effective finite element inverse analysis method was developed to monitor a thickness distribution of electroplating on a silicon wafer. The electrical resistances of the thin copper and tantalum nitride (Ta₂N₅) layers on the silicon wafer are taken into account. The silicon wafer is coated with a Ta₂N₅ sputtering layer before electroplating. A finite element method was used to calculate the potential on the silicon wafer. The cost function to be minimized in the inverse analysis is a function of the difference between the measured and calculated values of potential around the silicon wafer.

Key Words: Inverse Analysis, Finite Element Method, Thin Film, Electroplating

1. はじめに

近年 LSI の内部配線材料として、電気抵抗が小さく耐エレクトロマイグレーション性・耐ストレスマイグレーション性のある銅がアルミニウムの変わりに利用されてきている。配線の製造方法には、コストや生産性の面で有利、かつ、微細溝(孔)部への埋め込み性に優れた電気めっきの応用が試みられている⁽¹⁾。

めっき工程では、それに次ぐ研磨工程を容易にするためにめっき膜厚の均一性の確保が重要となるが、めっき膜を均一に作ることは難しい。そのため、リアルタイムにめっきの膜厚分布をモニタリングして、めっき条件を制御することが必要となる。薄膜の膜厚モニタリング手法はこれまでに報告されており、水晶振動子の共振周波数の変化から求める方法やマイクロバランスを利用する方法等がある⁽²⁾。しかしながら、これらの手法はめっき装置の機械的な制約上、電気めっきのリアルタイム計測には利用することが出来ない。

本研究では、逆解析を利用してシリコンウェハ上の銅めっき膜の膜厚分布をリアルタイムでモニタリングする手法を開発する。そのため、シリコンウェハのエッジ部の電極を使用して電流を印加し、シリコンウェハの外周における電位を測定する装置を提案する。逆解析における悪条件性を確かめるため、膜厚変化に対する電位の感度解析を行う。数値逆解析を行い本手法の有効性を確かめる。

2. めっき装置

めっき装置を Fig.1 に示す。装置は、硫酸銅溶液、アノー

ドとなる銅板、カソードとなるシリコンウェハ、電源からなる。アノードは厚い銅板でできているため、アノード内では電位が一定である。電気めっきを行う度に、アノードの一部はイオンとなって溶液内に溶出する。溶液内には銅イオンが含まれているので、電流が流れるとカソード側で銅イオンが非イオン化しシリコンウェハがめっきされる。新たな硫酸銅溶液は容器内に常に供給され、古い溶液は排出される。シリコン基板は薄膜が蒸着されており、この薄膜が導電体であるので、薄膜上に銅めっきが行われる。

シリコンウェハの端には Fig.1 に示すように、電気めっきを行うための多数の電極が付いている。電流はアノードから溶液を通り抜けてシリコンウェハ上の薄膜に流れ込み、電極から抜けていく。薄膜の膜厚は非常に薄いために、薄膜の抵抗は大きくなる。したがって、溶液からシリコンウェハ上に流れ込む電流は、外周部ほど多くなり、めっき速度が速い (Fig.2)。なお、めっき時にはシリコンウェハは回転しているため、回転軸に対して軸対称な膜厚分布をもつめっき膜が作られる。

3. モニタリングの原理

銅めっきの速度はシリコンウェハに流れ込む電流量に比例する。分極特性とシリコンウェハ上の微小的な状態によってシリコンウェハに流れ込む電流密度分布は変化する。これらの要因はめっき環境によって変化するので、めっき膜をリアルタイムでモニタリングすることが重要となる。しかしながら、容器は小さく、かつ容器内は硫酸銅溶液で満たされてい

るので、通常の膜厚測定器を置くことは出来ない。

本研究では、Fig.3に示すようなめっきモニタリング装置を提案する。モニタリングには、電気めっき時に使用する電極を利用する。電極はシリコンウェハ外周部に多数取り付けられている。モニタリング時は、シリコンウェハ内に外周部の特定の電極から電流を流し、シリコンウェハ外周の電位分布を計測する。逆解析を利用して、外周部の電位分布からウェハ全体のめっきの膜厚分布を推定する。

4. 順解析の数値モデル

めっき膜は、スパッタリング等で作成された薄い窒化タンタル (TaN) などのバリア層 および銅 (Cu) のシード層の上に施される。スパッタリングされた膜と銅めっき膜は非常に薄く電気抵抗が無視できないので、薄膜内の電位 ϕ は薄膜内の電流密度 i に依存する。薄膜の電気伝導度の分布を考慮して、薄膜内の電流密度 i を次のように定義する。

$$i = -\kappa \text{grad} \phi \quad (\kappa = t_s \kappa_s + t_p \kappa_p) \quad (1)$$

ここで、 t_s および κ_s はそれぞれ TaN のバリア層の厚さ [m] および電気伝導度 [$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$] である。 t_p は Cu のシード層およびめっき層の厚さ [m] であり、 κ_p は Cu の電気伝導度 [$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$] である。 κ はバリア層・シード層およびめっき層を含めた層の電気伝導度であり、位置の関数である。

一方、めっき膜内の微小領域における電荷の保存より、次式が得られる。

$$\text{div}(i) = 0 \quad (2)$$

式(1)および式(2)より、めっき膜内の電位 ϕ は以下の支配方程式を満足する。

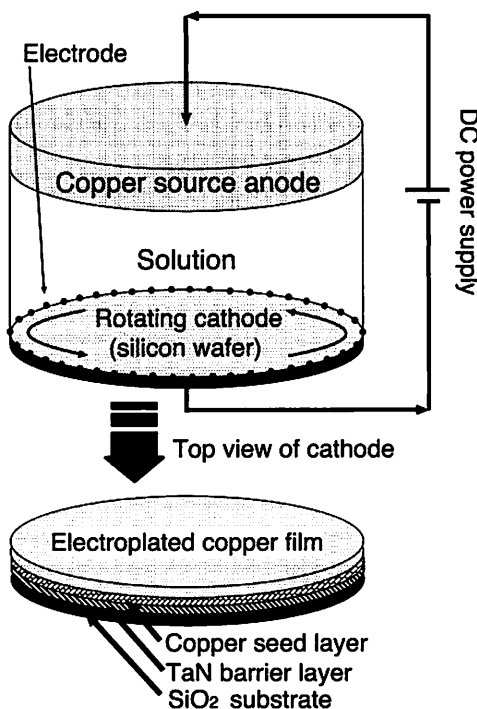


Fig. 1 Model of electroplating device

$$\text{div}(\kappa \text{grad} \phi) = 0 \quad (3)$$

式(3)の境界条件は次式で与えられる。

$$\phi = 0 \quad \text{接地点で} \quad (4)$$

$$i(\equiv \kappa \frac{\partial \phi}{\partial n}) = i_0 \quad \text{印加点で} \quad (5)$$

$$i = 0 \quad \text{その他のエッジ上で} \quad (6)$$

式(3)~(6)を有限要素法で解くことで、めっき面の電位分布を求める。(3)

シリコンウェハ内を流れる電流の一部は溶液に流れ出りますが、流出電流量は微量であり測定時間も少ないので、本研究では洩れ出る電流は考慮しない。

5. 感度解析

逆解析による膜厚分布の推定のしやすさを調べるため、Fig.4のような解析モデルを用いて、膜厚を変化させたときの、エッジ部における電位の感度解析を行った。

膜厚は各要素内で均一とし、解析領域は Fig.5 のように三角形要素を用いて要素分割した。接地点は印加点から 180 度の位置の A 点においた。Fig.5 の網掛け部のように、ドーナツ状にめっきの膜厚を 10[%] 厚くし、印加点に 1[mA] の電流を印加したときの電位分布を解析した。

各計測点における電位感度は次のように表す。

$$\Phi[\%] = \frac{\phi_a}{\phi_b} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 ϕ_a は膜厚を変化させた後に計測される電位であり、 ϕ_b は変化前の電位である。

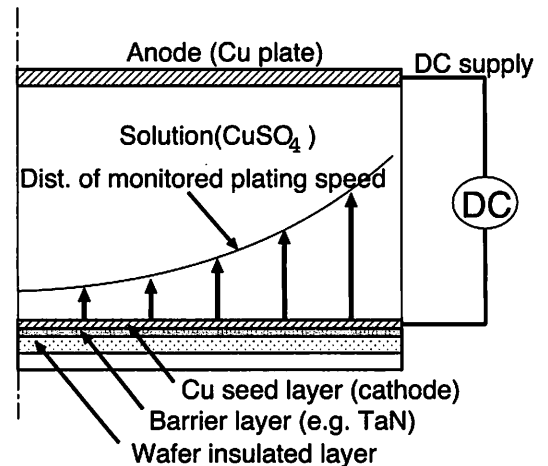


Fig. 2 Cross-sectional view of electroplating device

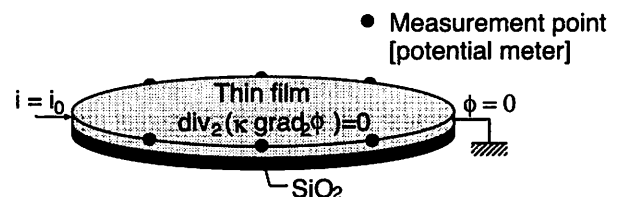


Fig. 3 Model of electroplating monitoring on silicon wafer

Fig.6 は均一な膜厚のシリコンウェハ上に、電流の印加点と接地点を180度対極した位置においた際のエッジ部での電位分布を示している。Fig.7は膜厚分布が均一のときの測定電位に対する、種々の位置における膜厚を10[%]変化させたときの測定電位の感度分布を表す。シリコンウェハのエッジ部における膜厚変化は、エッジ部の電位分布に大きく影響を与えるが、内部での膜厚変化は、エッジ部での電位分布に影響をあまり与えないことが分かる。このことは、外部の膜厚分布ほど推定しやすい事を示している。

6. 逆解析

6.1. 逆解析手法

エッジ部で測定された電位から、めっき膜の膜厚分布の推定するための逆解析を説明する。めっき膜はウェハ中心に対して対称に成膜されるので、膜厚分布を半径方向にリング形状で N 個の領域に離散化する。本逆問題の設計変数は各要素のめっき膜厚 t_j ($j = 1, \dots, N$) とする。目的関数は、次式に示すように観測される電位 $\phi_{c,i}(t)$ と計算で求めた電位 $\phi_{M,i}$ の差異の二乗和とする。

本逆問題は目的関数式 (8) を最小にする設計変数 t_j を求める最適化問題に帰着される。

$$F(t_1, t_2, \dots, t_N) = \sum_{i=1}^m (\phi_{c,i}(t) - \phi_{M,i})^2 \quad (8)$$

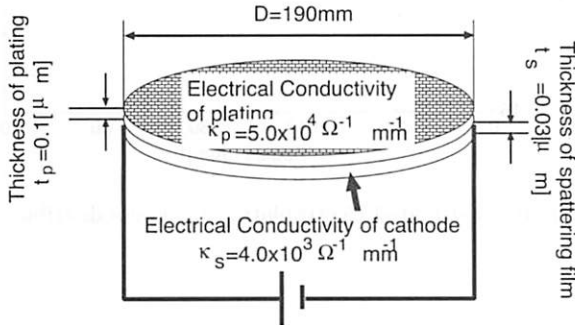


Fig. 4 Detail of the specimen specification

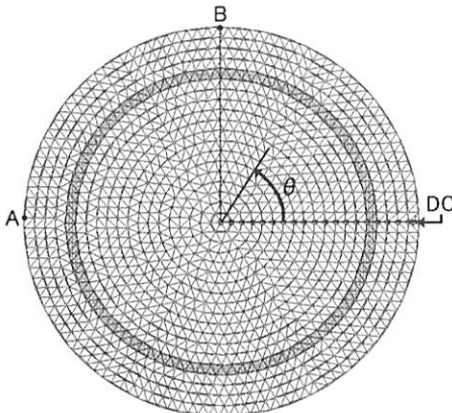


Fig. 5 Mesh of electroplating on silicon wafer

ここで、 m はシリコンウェハの端に置かれた電位測定点の数を表す。具体的な解析手順は Fig. 8 に示す通りである。始めに、電気伝導度や寸法は感度解析に利用した値を与える。次に、めっき膜厚分布の初期値を設定し、シリコンウェハ上の電位分布を有限要素法により計算する。目的関数の値が収束するまで、めっき膜厚分布 t_j を最適化手法で更新し、電位分布を計算し直す。

目的関数式 (8) は多数の膜厚 t_j の組合せで最小値をとる。組合せの中には振動解も含まれるので、これを排除するために Tikhonov の方法 (Tikhonov 係数 α) で制約を与える (5)(6)。

以下のように Tikhonov の方法を適用すると目的関数式 (8) は以下ようになる。

$$F(t_1, t_2, \dots, t_N) = \sum_{i=1}^m (\phi_{c,i}(t) - \phi_{M,i})^2 + \alpha \sum_{k=1}^{N-1} (t_{k+1} - t_k)^2 \quad (9)$$

ここで、 α は Tikhonov 係数である。目的関数の最小化にはシンプレックス法を利用した。

6.2. 解析例

逆解析手法の有効性を検証する。軸対称モデルを考え、解析条件には前項における感度解析に利用した条件と同じ値を与えた。Fig 9 に示したようにシリコンウェハを12領域に分割した。各領域は中心の一領域を除いてリング形状をして

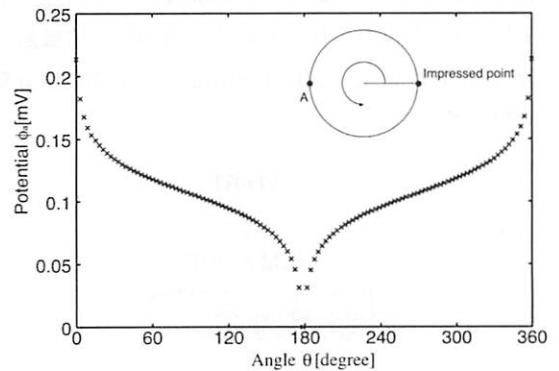


Fig. 6 Potential distribution on edge of silicon wafer

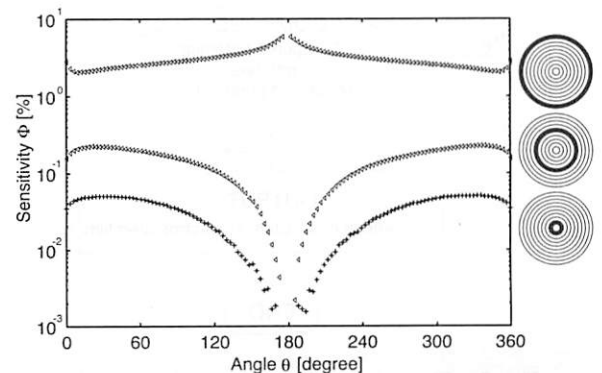


Fig. 7 Sensitivity distributions of potential

おり、同一領域内では膜厚は均一である。シリコンウェハは外周部ほど不均一にめっきされやすいので、比較的均一な内周部の領域は大きな幅で分割した。Tikhonov 係数 α として 1000 を与えた。

解析しためっき膜厚分布を Fig. 10 に示した。×印は初期値として与えた膜厚分布であり、+印は仮定した正解値、*印は逆解析により推定された値である。推定された膜厚分布は平均誤差 5.7[%] となり、実用上問題ない精度で膜厚分布を推定できた。

7. 結言

本研究では、めっき膜に電流を流し、エッジ部で検出した電位を利用してめっき膜の膜厚分布をモニタリング方法を提案した。本手法で用いるモニタリング装置は、めっきする際に使用する電極を利用するので、めっき装置を大幅に改良しなくてすむ利点がある。提案した方法の有効性を確かめるために、膜厚変化によるエッジ部の電位変化を解析し、内部に比べて外部の膜厚変化によるエッジ部での電位の感度が大きいことを確認した。エッジ部で計測した電位からめっき膜の膜厚分布を求める逆解析手法を開発し、その有効性を確かめた。

参考文献

- (1) 新宮原正三, 栗屋信義, 上野和良 編: Cu 配線技術の最新展開, (1991), リアライズ社,
- (2) 日本表面科学学会 編: [図解] 薄膜技術, (1999), 培風館,
- (3) 矢川元基, 吉村忍: 有限要素法, (1995), 培風館,
- (4) 渡部力, 名取亮, 小国力: Fortran77 による数値計算ソフトウェア, (1991), 丸善,

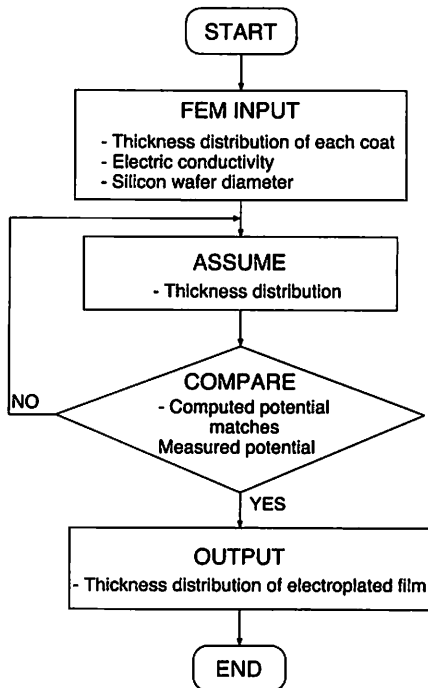


Fig. 8 Flow chart of inverse analysis method

- (5) A. N. TIKHONOV AND V. Y. ARSENIN: *Solutions of Ill-Posed Problems*, Scripta Series in Mathematics, John Wiley & Sons, (1977), New York,
- (6) Woodbury, K. A. (ed.): *Inverse Engineering Handbook*, (2002) CRC Press,

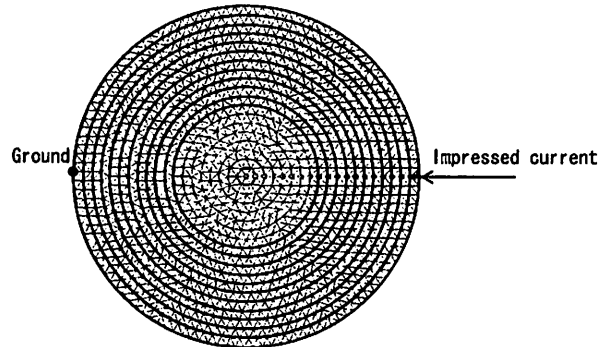


Fig. 9 Discretized thickness distribution

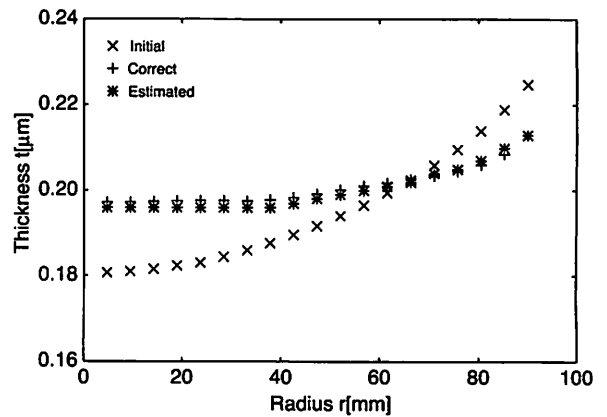


Fig. 10 Estimated electroplating thickness distribution