

境界要素法を用いた多機能電解めっき解析システムの開発

Development of Multifunction Electro Plating Analysis System Using Boundary Element Method

早房敬祐* 下山正**
Keisuke HAYABUSA Masashi SHIMOYAMA
天谷賢治** 中田勉**
Kenji AMAYA Tsutomu NAKADA

近年LSI配線の形成法として電解銅めっきが広く普及しているが、配線の微細化に伴いウェーハ端部の膜厚が極端に高くなるターミナルエフェクトの問題が顕著となっている。めっき工程にて可能な限り膜厚分布を均一にする必要があるが、最適な条件を求めるには長年の経験や多くの実験を要するため、めっきプロセスの構築に数値解析を併用することが一般的になってきている。著者らはウェーハの下地膜抵抗、多数電極、遮蔽板、高抵抗体を取り扱った問題に対し、ベクトル型の境界条件及び領域分割法を適用した境界要素法を適用し、数値解析と実験との比較によって開発した手法の妥当性を示した。

Recently electro copper plating has been widely used for LSI interconnections. Because of the miniaturization of interconnections, the film thickness of wafer edges becomes extremely high. This phenomenon is particularly noticeable and called the terminal effect. In a plating process, film thickness distribution must as even as possible. Since extensive experience or numerous experiments are necessary to determine conditions optimal for plating, it has become common to include numerical analysis in building plating processes. The authors have proved the validity of a method developed by comparing numerical analysis to experimental data. This method applies vector-type boundary conditions and the region division method to issues subject to the base film resistance of wafers, multi-electrodes, shielding plate, and high resistors.

Keywords: Multiple Domain, Boundary Element Method, Numerical Analysis, Electrochemistry, Electroplating

1. 緒言

近年LSI配線の形成法として電解銅めっきが広く普及しており、コストや生産性、及び、微細溝・微細孔への埋込性に優れているという利点を有している。その一方で、配線を微細化するにはシード層・バリア層を薄膜化する必要があり、抵抗の増加を引き起こす要因となっている。抵抗の増加によってめっきの際にシリコンウェーハ（以下、ウェーハ）端部の膜厚が極端に高くなるターミナルエフェクトが発生し、ウェーハ上の膜厚分布が不均一になる¹⁾。これによって後の研磨工程に要する時間が増大したり、チップ内の電極サイズにばらつきが生じる等の不具合が発生するため、めっき工程において可能な限り膜厚分布を均一にすることが重要となる。

これに対して電極、めっき槽、遮蔽板の形状、電流値及びめっき時間等を調節することで膜厚分布の平坦化が

なされるが、最適な条件を求めるには長年の経験や多くの実験を要するため、めっきプロセスの構築に数値解析を併用することが一般的になってきている。小原ら^{2), 3)}は有限要素法、M. Purcarら⁴⁾は境界要素法に基づいた数値解析プログラムを開発している。一方、著者らは、a) ウェーハの下地膜抵抗、b) 多数電極、c) 遮蔽板、d) 高抵抗体、e) 種々の対称性をもつ問題、に対応可能な境界要素法プログラムを開発しており、a), b) についてはベクトル型の境界条件、c), d) については領域分割法、e) については多様な対称性に対する境界要素法のアルゴリズムを適用している^{5)~13)}。これによって、種々の要求される機能に対して共通の手法で対応することで効率的なプログラムを実現している。本論文ではa)~e)の手法を示すとともに、その結果について実験値との比較を行い、開発したプログラムの妥当性を検証した。

2. めっき膜厚分布の解析方法

2-1 電解めっき装置の構成

図1に電解銅めっき装置の構成を示す¹⁴⁾。直方体のめっき槽においてウェーハとアノードを向かい合わせて配置

* 技術・研究開発統括部 基盤技術研究部
** 技術・研究開発統括部 製品コア技術研究部
*** 東京工業大学

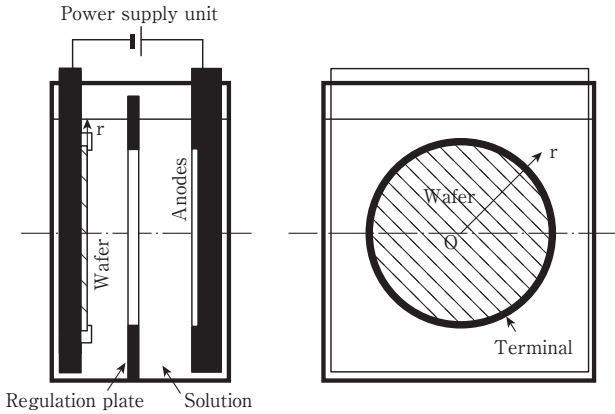


図1 電解めっき槽
Fig. 1 Electro plating bath

し、槽内部はめっき液で満たされている。その中間には膜厚分布を平坦化することを目的とした遮蔽板やめっき液を攪拌するパドルが設置されている。また、ウェーハ表面において電流を流してめっきを析出させるためのシード層や銅の拡散を防ぐためのバリア層（以下、これらを合わせて下地膜と呼ぶ）が施されており、ウェーハ表面がカソードとなる。ウェーハ外周には吸電ターミナル（以下、接点と呼ぶ）が設置されており、ウェーハの下地膜に流入した電流が最終的に流出する電極となる。上記の構成に対して外部電源によって指定の直流電流を供給し、ウェーハ表面にめっきを析出させる。

2-2 膜厚分布の不均一性の評価

電解銅めっき装置の構成について、模式図及び電気回路図を併せて図2に示す。ウェーハと接点の間で生じる接触抵抗を無視すると、電源電圧 ϕ_E 、下地膜抵抗 R_f 、アノード分極抵抗 R_a 、ウェーハ表面のカソード分極抵抗

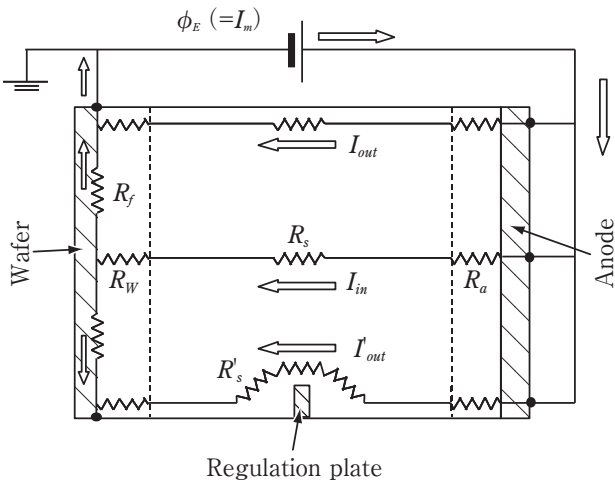


図2 めっき層の電気回路図
Fig. 2 Circuit diagram for plating bath

R_w 、めっき液抵抗 R_s より、ウェーハの中心付近に流れる電流値 I_{in} 、及び、外周付近に流れる電流値 I_{out} は次式で表される。

$$I_{in} = \frac{\phi_E}{R_a + R_s + R_w + R_f} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{out} = \frac{\phi_E}{R_a + R_s + R_w} \dots\dots\dots (2)$$

下地膜が薄くなると R_f が無視できず $I_{in} < I_{out}$ となり、結果として外周付近の膜厚が増大する。これに対し、遮蔽板を設置して電流の経路を伸延させて R_s を大きくすることによって、式 (1) 及び式 (2) の分母の全体に対する R_f の割合が低下し、膜厚分布が平坦化する^{1), 15)}。

実際のめっき槽に対して定量的な検討を行う場合、めっき面は2次元、めっき液領域は3次元空間として取り扱う必要がある。また、アノード分極抵抗 R_a 及びカソード分極抵抗 R_w は電流密度若しくは電位に依存した非線形関数であることから、理論解を得ることは不可能である。そこで本研究では、数値解析手法を導入し、ウェーハについては有限要素法、めっき液領域については境界要素法を適用して膜厚分布を求めた^{9) ~ 11)}。

2-3 基礎式

図3に今回取り扱うめっきシミュレーションの支配方程式及び境界条件を示す。まず、めっき液領域の支配方程式は次式の Laplace 方程式で表される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) を2回積分して整理すると、以下の境界積分方程式が得られる。

$$kc(p)\phi(p) = \int_{\Gamma} \{(\phi^*(q, p)i(q) - \phi(q)i^*(q, p))\} d\Gamma(q) \dots (4)$$

k は溶液の電気伝導度、 p はソース点、 q は観測点、 $\phi(q)$ 、 $i(q)$ は点 q における電位及び電流密度、 $\phi^*(q, p)$ 、 i^*

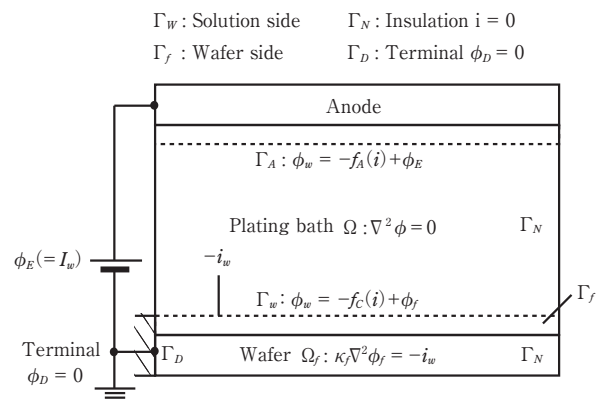


図3 支配方程式と境界条件
Fig. 3 Governing equation and boundary condition

(q, p) は基本解を表し、3次元領域を考慮する場合はそれぞれ次式で表される。

$$\phi^*(q, p) = \frac{1}{4\pi r(q, p)} \dots\dots\dots (5)$$

$$i^*(q, p) = k \frac{\partial \phi}{\partial n} \dots\dots\dots (6)$$

前述のとおり、ウェーハ上には導電性の下地膜が施されているが、膜厚が薄い場合その抵抗を考慮する必要がある。そこでウェーハの下地膜は次式のPoissonの方程式によってモデル化する。

$$k_f \nabla^2 \phi_f = -i_w \dots\dots\dots (7)$$

k_f は下地膜の電気伝導度、 i_w はウェーハ表面に流入する電流密度のベクトル、 ϕ_f はウェーハ下地膜内の電位分布のベクトルを表す。一方、めっきプロセスでは各電極にて電流値 I_m を指定するため、本解析では以下の条件を付加する。

$$\int_{\Gamma_m} i d\Gamma = I_m \quad (m = 1 \sim n_e) \dots\dots\dots (8)$$

n_e はウェーハ以外の電極数を表し、ウェーハに流れる電流値 I_w は次式で表される。

$$I_w = -\sum_{m=1}^{n_e} I_m \dots\dots\dots (9)$$

式(4)～(9)を離散化、連立して各境界条件を適用することでめっき槽及びウェーハ上の電位、電流密度分布が求められる。まず、式(4)に対して一定要素を適用して離散化すると次式が得られる。

$$H\phi - Gi = 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここで H 及び G は解析場の幾何的及び材料的条件で決まるマトリクス、 ϕ 及び i は各要素上の電位 ϕ 及び電流密度 i の境界値のベクトルを表す。表は一般的な電解めっきの境界条件を示しており、アノード境界 Γ_A 、ウェーハ表面の境界 Γ_w 、絶縁境界(遮蔽板やめっき槽壁面等) Γ_N からなる。アノード及びウェーハは金属面であるため、電流密度 $i (=x)$ を未知量とした分極曲線 $\phi = -f(i)$ に従う。絶縁境界は電流密度0、電位が未知量の境界となる。これらの未知量のベクトルをまとめて $x = \{x_A, x_w, x_N\}$ で示す。

表 電解めっきの境界条件

Table Boundary condition for electro plating

Boundary Condition	Potential	Current Density
Anode Γ_A	$-f_A(x_A)$	x_A
Wafer Γ_w	$-f_w(x_w)$	x_w
Insulation Γ_N	x_N	$i_N (=0)$

3. ベクトル型境界条件

3-1 基礎式

前述のようにめっき解析では電極における電流値指定(式(8))やウェーハ下地膜の抵抗(式(7))を取り扱う必要がある。これらを個別に対応した場合プログラムは肥大化してしまうため、本研究ではこれらの条件を統一した形式で扱うことができるベクトル型の境界条件を適用した。

$$\phi_v = Ax_v + b \dots\dots\dots (11)$$

$$i_v = Cx_v + d \dots\dots\dots (12)$$

式(11)、式(12)はある要素グループの未知量 x_v と境界値 ϕ_v, i_v の関係を示している。

3-2 ウェーハ下地膜の取扱い

ウェーハ下地膜の支配方程式である式(7)に対して数値解析手法である有限要素法を導入するとともに、前述のベクトル型境界条件として定式化する過程を示す。まず、ウェーハの下地膜及びめっきの膜厚はウェーハ径に対して著しく小さいため、2次元問題として取扱い膜厚分布をパラメータとする。図3及び図4に示すようにウェーハ端部において接点 Γ_D における電位は $\phi_f = 0$ 、接点以外のウェーハ端部 Γ_N における電流は $i_f = 0$ 、ウェーハ表面に流れ込む電流密度 $-i_w$ を考慮し、次式で示されたウェーハ全体の連立方程式を解く。

$$K\phi_f^* = -i_w (= -x_w) \dots\dots\dots (13)$$

K は各節点座標によって決まる係数マトリクス、 ϕ_f^* はウェーハ上節点の電位ベクトル、 i_w はウェーハ上の各要素に流入する電流密度ベクトルを表す。ここで、ウェーハ上のメッシュは溶液部の境界要素モデルとウェーハ部の有限要素モデルの共有部となっている。本解析の境界

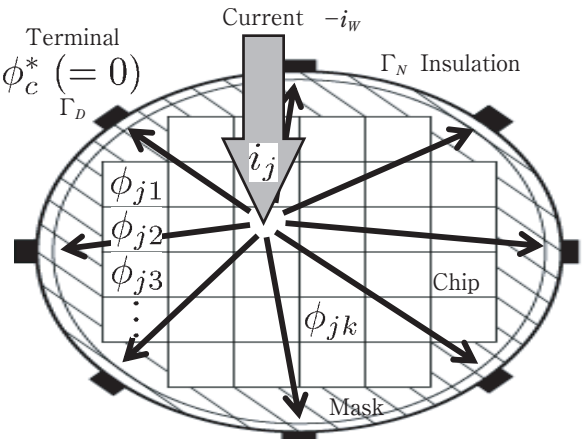


図4 ウェーハモデル
Fig. 4 Wafer model

要素モデルは要素内で一定の値をもつ一定要素を採用しているのに対し、有限要素モデルは各節点で値をもつ1次要素となっている。両者を共有するために有限要素モデルの要素内で節点値の平均値を求めて要素値として取り扱った。

次に、ウェーハ下地膜内の挙動をベクトル型境界条件で表す方法について説明する。図4は電流 $-i_w$ が溶液側からのウェーハに流入して下地膜を伝わり接点から流出する様子を示しており、下地膜は抵抗が大きいため電位分布が生じる。そこでまず、前述の境界条件 Γ_D , Γ_N を考慮し、ある要素 j に電流密度 1 A/m^2 を流入させた場合の有限要素解析を行い、ウェーハ上の全要素における電位分布 ϕ_j を求める。

$$\phi_j = \{\phi_{j1} \ \phi_{j2} \ \dots \ \phi_{jn_j}\}^T \dots\dots\dots (14)$$

さらに、単位電流密度の印加を別の要素 i_{j+1} についても同様に行い、それをウェーハ上の全要素（要素数 n_j ）に対して繰り返し適用する。これによって得られた電位を列ベクトルとして配置し、次式で示すマトリクスを作成する。

$$A_j = \{\phi_1 \ \dots \ \phi_j \ \dots \ \phi_{n_j}\} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1j} & \dots & \phi_{1n_{j1}} \\ \phi_{12} & \dots & \phi_{1j} & \dots & \phi_{1n_{j2}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \phi_{1n_j} & \dots & \phi_{1j} & \dots & \phi_{1n_{jn_j}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

ウェーハ内の電位分布 ϕ_j はそれぞれの要素に流入した電流密度の重ね合わせで表現できる。求めた A_j とウェーハに流入する電流密度ベクトル i_w を用いて次式で表される。

$$\phi_j = A_j i_w \dots\dots\dots (16)$$

めっき液側の電位 ϕ_w と連立させるためには図3の破線部で示されたウェーハ表面の電位ギャップを加算した次式となる。

$$\phi_w = A_j i_w - f_w(i_w) \dots\dots\dots (17)$$

この式を式 (11), 式 (12) 同じベクトル f 型の境界条件で表すと次式が得られる。

$$\phi_w = A_j x_w - f_w(x_w) \dots\dots\dots (18)$$

$$i_w = E x_w \dots\dots\dots (19)$$

3-3 電流値指定境界の取扱い

電気めっきプロセスにおいて電流値の指定は重要な条件の一つである。ここでは前述のベクトル型境界条件を用いてウェーハ、アノードを始めたとする各電極について電流値指定する方法を示す。ある電極 m において指定する電流値 I_m は電極を構成する要素 j における面積 S_j 及び電流密度 i_j を用いて次式で表される。

$$I_m = \sum_{j=1}^{n_m} S_j i_j \dots\dots\dots (20)$$

n_m は電極上の要素数を表す。ここで、ある要素（要素は任意に選択可）に着目してその要素番号を1とし、その電流密度 i_1 について式 (20) を変形すると次式が得られる。

$$i_1 = -\frac{S_2}{S_1} i_2 - \frac{S_3}{S_1} i_3 \dots - \frac{S_{n_m}}{S_1} i_{n_m} + \frac{I_m}{S_1} \dots\dots\dots (21)$$

電流値指定の場合、電源によるオフセット電圧 ϕ_E が未知数となる。電極上の電位 ϕ_A は電極表面の分極抵抗 $-f_A(i_A)$ を加味し、次式で表される。

$$\phi_A = \phi_E - f(i_A) \dots\dots\dots (22)$$

式 (21) 及び式 (22) より、ベクトル型境界条件の未知ベクトルは次式で示すように要素1が電位、その他の要素が電流密度の成分をもった形式となる。

$$x_A = \{\phi_1, i_2, \dots, i_{n_m}\}^T \dots\dots\dots (23)$$

以上より、ベクトル型境界条件は次式となる。

$$\phi_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} x_A - f_A(i_A) = A_A x_A - f_A(i_A) \dots\dots\dots (24)$$

$$i_A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{S_2}{S_1} & \dots & -\frac{S_{n_m}}{S_1} \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} x_A + \begin{bmatrix} \frac{I_m}{S_1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = C_A x_A + d_A \dots\dots\dots (25)$$

ウェーハ上を電流値指定境界とするとプログラムが複雑になるため、ここではウェーハ以外の電極を電流値指定境界とする。よって、ウェーハを含めた電極数が $m+1$ のとき、電流値指定境界は m となる。

3-4 ベクトル型境界条件を含む場合のヤコビアン

式 (10) に対して式 (18), 式 (19), 式 (24), 式 (25) を代入すると次式が得られる。

$$H \begin{Bmatrix} x_N \\ A_A x_A - f_A(C_A x_A + d_A) \\ A_j x_w - f_w(x_w) \end{Bmatrix} - G \begin{Bmatrix} i_N \\ C_A x_A + d_A \\ E x_w \end{Bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (26)$$

式 (26) は未知量ベクトル $x = \{x_N, x_A, x_w\}^T$ に関する非線形連立方程式であり、ニュートンラフソン法により解析を行う。この方法を使用する際 H や G のヤコビアンを求めておく必要があるため、ベクトル型境界条件が存在する場合のヤコビアンの式について検討を行う。まず、式 (26) を残差ベクトル r で表すと次式となる。

$$r = H\phi - Gi \dots\dots\dots (27)$$

残差ベクトル r を未知ベクトル x で偏微分すると次式が得られる。

$$J = \frac{\partial r}{\partial x} = H \frac{\partial \phi}{\partial x} - G \frac{\partial i}{\partial x} \dots\dots\dots (28)$$

式 (26) における電極に関する項（ベクトル部分の2行

目に相当)に着目すると、電位ベクトル及び電流密度ベクトルはそれぞれ次式になる。

$$\frac{\partial \phi_A}{\partial x_A} = A_A - \frac{\partial f_A}{\partial x_A} C_A \dots\dots\dots (29)$$

$$\frac{\partial i_A}{\partial x_A} = C_A \dots\dots\dots (30)$$

ヤコビアン J は非対角項に成分をもつマトリクスとなる。

4. 領域分割法

4-1 定式化

めっきプロセスにおいて膜厚分布の平坦化を図るためにめっき槽内に遮蔽板や高抵抗体を設置することがある。阿部らはめっき槽内に薄い遮蔽板を設置するケースについて、特別な重み関数を基本解の代わりに用いることによって解析を行っている⁵⁾。一方、青木らは電気伝導度が土壤中でゆるやかに変化するケースに対し、電気伝導度が直線的に変化する場合の基本解を導出して解析を行っている⁷⁾。これらについて個々に対応するとプログラムが煩雑になるため、本論文では領域分割法によって上記問題に対応する方法を示す^{16), 17)}。

領域分割法はいくつかの均質な領域からなる系に対し、各々の領域に対して境界積分方程式を適用し、それぞれの領域間で適合条件を満足させることで問題を解く方法である。図5のように電気伝導度 k_1, k_2 をもつ各領域を領域 Ω_1 と領域 Ω_2 に分割した場合、それぞれの領域について離散化した境界積分方程式が得られる。

$$[k_1 H^1 k_1 H_1^1] \begin{Bmatrix} \phi^1 \\ \phi^1_i \end{Bmatrix} = [G^1 G_1^1] \begin{Bmatrix} i^1 \\ i^1_i \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (31)$$

$$[k_2 H^2 k_2 H_2^2] \begin{Bmatrix} \phi^2 \\ \phi^2_i \end{Bmatrix} = [G^2 G_2^2] \begin{Bmatrix} i^2 \\ i^2_i \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (32)$$

ここで、添字 1, 2 は各領域、下添字 I は領域 Ω_1 と Ω_2 の界面に対応しており、領域 Ω_1 における境界 Γ_1 上の境界値は ϕ^1, i^1 、領域 Ω_2 における境界 Γ_2 上の境界値は ϕ^2, i^2 で表される。ここで、界面 Γ_I で電位 ϕ は連続であるこ

と、界面 Γ_I を通過する電流 i_I は等しいことを考慮すると次式が得られる。

$$\phi^1 = \phi^2 = \phi_I \dots\dots\dots (33)$$

$$i^1 = -i^2 = i_I \dots\dots\dots (34)$$

式 (34) について i^1_i と i^2_i の符号が異なるのは電流の流入と流出を意味していることによる。これらの条件を考慮して境界積分方程式を連立すると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} k_1 H_1 & k_1 H_{1I} & 0 \\ 0 & k_2 H_{2I} & k_2 H_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_I \\ \phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & G_{1I} & 0 \\ 0 & -G_{2I} & G_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_1 \\ i_I \\ i_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (35)$$

前述の式 (10) と同様の解法によって解を得ることができる⁸⁾。

4-2 領域分割法を使った種々の解析

遮蔽板のような薄板構造を含む場合、薄板の表裏にソース点を設置した際に得られるポテンシャル分布はほとんど同一となり、マトリクスが特異となり解析不能に陥ることがある⁵⁾。これに対して図5に示すように遮蔽板開口部に仮想境界 Γ_I を設置して領域分割し、領域1及び領域2をそれぞれ式 (31)、式 (32) に対応させることで特異性の問題を回避できる。ここでの各領域の電気伝導度は同一 ($k_1 = k_2$) とし、仮想境界 Γ_I における境界条件は式 (33)、式 (34) を適用し、それ以外の遮蔽板上の境界は絶縁 $i = 0$ とする。

一方、ウェーハとアノードの間に高抵抗体を挿入する場合の解析についても領域分割法が適用できる^{1), 15)}。例えば、図5の領域2を高抵抗体とすると $k_1 > k_2$ となり、高抵抗体とめっき液の界面を Γ_I とし、界面上は通電するものとして解析する。

5. 数値シミュレーションと結果の検証

5-1 3次元めっき膜厚シミュレーション

提案した3次元膜厚シミュレーション手法の有効性を示すためにバンプめっきを対象としてシミュレーションを実施した。ウェーハは図6に示した8つの接点をもつウェーハホルダーを使用し、めっき槽形状の対称性を考慮して図7に示した1/4を解析領域とした。モデルはウェーハ部、アノード部及び絶縁部で構成され、ウェーハ部についてはめっきを析出させる領域Aとフォトレジスト(以下、マスクと呼ぶ)によって電流が遮蔽される領域Bからなる。マスクされた領域Bにおいて電流は流れ込まないが、マスクがない領域Aで流れ込んだ電流はマスクの下層にある下地膜を伝って接点に流れるため、その際の抵抗を考慮した。めっき液の電気伝導度 52.7 S/m、電流 0.92 A にて2時間半、分極曲線は図8を用いて解析を行っ

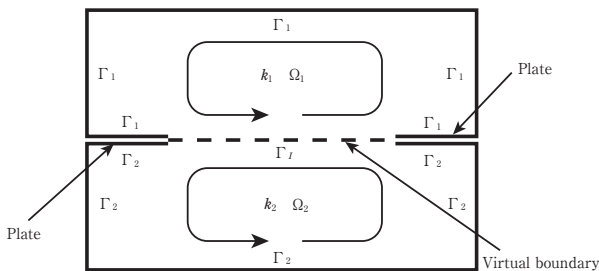


図5 領域分割法
Fig. 5 Multiple domain method

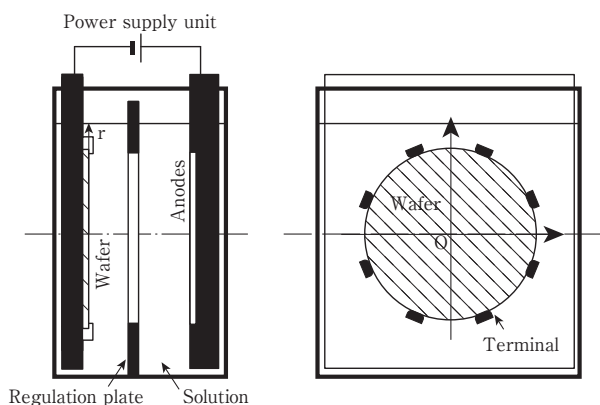


図6 8つの接点をもつウェーホルダー

Fig. 6 Wafer holder with 8 terminals

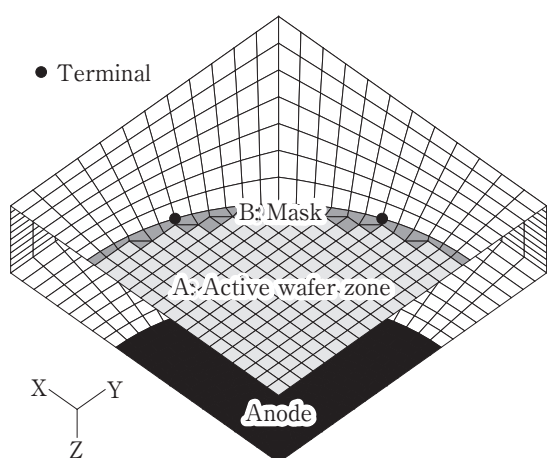


図7 三次元膜厚シミュレーションモデル

Fig. 7 3D simulation model

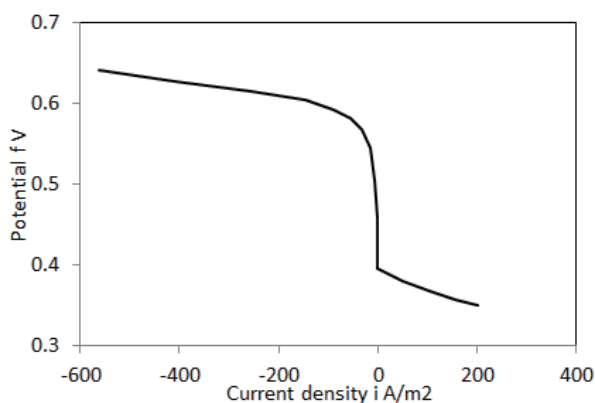


図8 分極曲線

Fig. 8 Polarization curve

た。本解析では領域Bにおけるマスクの有無による面内均一性「 $= (\text{膜厚最大} - \text{膜厚最小}) / \text{平均膜厚}$ 」の挙動について評価を行った。図9 (a) はマスクの無い場合、図9 (b) はマスクのある場合の膜厚分布を示している。

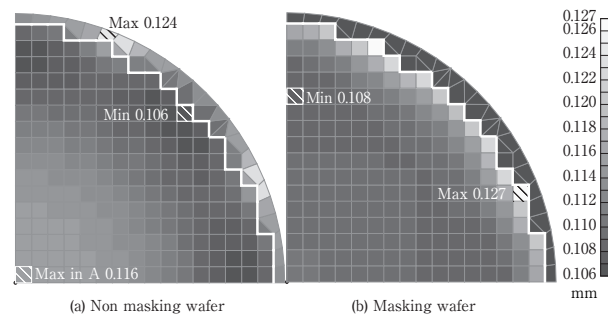


図9 膜厚分布

Fig. 9 Distribution of thickness on chips

図9 (a) はマスクがないためウェーハ外周部にも電流が流れており、膜厚最大値は接点近傍にて0.124 mm、膜厚最小値は接点間の中間にて0.106 mm、面内均一性は15.9%であった。一方、図9 (b) はマスク箇所での膜厚分布が0となり、膜厚最大値はその内側にて0.127 mm、膜厚最小値は0.108 mm、面内均一性は17.2%であった。ここで、図9 (a) の領域Bについて製品に使用しないものとして除外すると、膜厚最大値は0.116 mmとなり、(a) の面内均一性は8.6%となった。これによって、あえてマスクを設けずにウェーハ外周部にめっきを析出させることで実質的に面内均一性を向上させることができることをシミュレーションで示すことができた。

5-2 軸対称シミュレーションと実験値の比較

バンプめっきを対象として数値シミュレーションと実験の膜厚分布の比較を行った。図6のめっき槽に対して計算を効率化するため、めっき槽を直方体に見立て、内接する円筒形状で近似した。ウェーハホルダーが8接点であることを考慮して、図10に示すケーキ状の1/16領域を解析モデルとした。この対称性の取扱いについては著者らが開発した多様な対称性に対する境界要素法のアルゴリズムを適用した¹³⁾。境界条件及び要素分割数は図10(a)に示した断面の各線分毎に定義し、周方向の要素分割数を5として設定した場合の要素数は320、節点数は380であった。ウェーハの仕様及び他の条件は前節と同一とし、平均電流密度を500 A/m²、実際のめっき膜の厚さ計測は

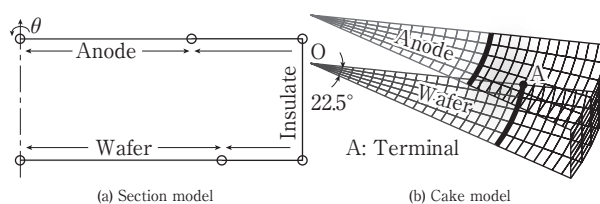
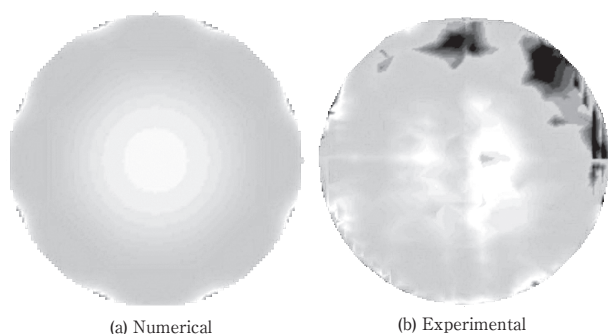


図10 バンプめっきの数値シミュレーションモデル

Fig. 10 Simulation model in case of bump plating



(a) Numerical (b) Experimental

図11 基準化したCu膜厚分布

Fig. 11 Distribution of the Cu thickness

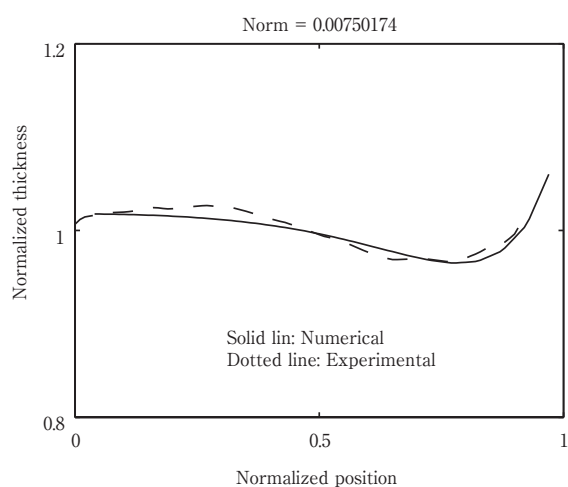


図12 ウェーハ中心から外周 (図10記載のOA) のCu膜厚分布
Fig. 12 The Cu thickness on the OA

抵抗式膜厚計によって測定した。ここで、数値シミュレーション及び実験による膜厚分布について、膜厚平均値で割って基準化した結果をそれぞれ図11 (a), (b) に示す。図11 (a) と (b) を比較すると、実験の膜厚分布に若干のむらが生じているものの、実験、計算ともウェーハ中心部及び接点付近の膜厚が大きくなっており、その傾向は一致していた。また、図12はウェーハ中心から外周の膜厚分布を表しているが、数値シミュレーションと実験の結果はほぼ一致しており、高い精度の結果が得られていることがわかった。

6. 結 言

本研究では領域分割法及びベクトル型の境界条件を適用できる境界要素法プログラムを開発し、電解銅めっきを対象として様々な機能に対応した数値シミュレーションを実現し、以下のことを明らかにした。

(1) ウェーハの下地膜抵抗、多数電極についてはベク

トル型の境界条件、遮蔽板及び高抵抗体については領域分割法で対応することで、プログラムを肥大化することなく多くの機能に対応した数値シミュレーションプログラムを実現した。

(2) 膜厚分布について数値シミュレーションと抵抗式膜厚計による計測結果を比較したところ両者の傾向はほぼ一致していた。これによって、開発したプログラムは高い精度の結果が得られており、その妥当性を検証することができた。

参 考 文 献

- 1) Kanda, H., Mine, J., Yamamoto, S., Kurashina, K., Hayabusa, K., Susaki, A., Nakada, T., Development of Cu damascene electroplating machines for interconnects on highly resistive substrates, EBARA ENGINEERING REVIEW, No.222 (2009), pp.10-18 (in Japanese).
- 2) Obara, K., Hatase, H. and Sakurai, T., Calculation of current distribution and surface finishing, The journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.47, No.9 (1996), pp.751-757 (in Japanese).
- 3) Obara, K., Equation of the Film Thickness of Electroplating Using Current Distribution Analysis, The journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.61, No.5 (2010), pp.366-370 (in Japanese).
- 4) M., Purcar, C., Munteanu and V., Topa, 3D electrode shape change simulation in electroplating, Rev. Roum. Sci. Techn. -Electrotechn. et Energ., Vol.58, No.3, pp.256-257 (2013).
- 5) Abe, K., Amaya, K., Aoki, S., Potential field BEM analysis for thin structure by special weighting function, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A (2004), Vol.70, No.689, pp.31-35 (in Japanese).
- 6) Amaya, K., Naruse, N., Aoki, S., Miyasaka, M., Efficient boundary element method for large scale corrosion problem, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A (1999), Vol.65, No.635, pp.1439-1497 (in Japanese).
- 7) Aoki, S., Takahashi, T., Amaya, K., Urago, M., Nishikawa, A., Boundary element analysis of galvanic corrosion of long structure buried in soil with gradient electrical conductivity, Journal of Society Material Science, Vol.46, No.2 (1997), pp.172-175 (in Japanese).
- 8) Aoki, S., Amaya, K., Miyasaka, M., Boundary element analysis on corrosion problems (1998), Shokabo, pp.35-36 (in Japanese).
- 9) Aoki, S., Amaya, K., Takazawa, H., Miyasaka, M., Boundary element simulation of electroplating on silicon wafer, The Journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.51, No.4 (2000) pp.425-430 (in Japanese).
- 10) Hayabusa, K., Takemura, T., Amaya, K., Abe, K., Development of a plating analysis system for cyclic symmetry models, Proceedings of the Mechanical Engineering Congress, Vol.1, No.05-1 (2005), pp.55-56 (in Japanese).
- 11) Hayabusa, K., Amaya, K., Development of a plating simulation method for 3-Dimensional models, Proceedings of M&M 2006, No.06-4 (2006), pp.409-410 (in Japanese).
- 12) Hayabusa, K., Takemura, T., Amaya, K., Development of the optimization technology in planarizing process on semiconductor plating, Proceedings of the Mechanical Engineering Congress, Vol.6, No.07-1 (2007), pp.139-140 (in Japanese).

- 13) Hayabusa, K., Amaya, K., Boundary element algorithm and data structure for variety of symmetries, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.75, No.749 (2008), pp.21-26 (in Japanese).
- 14) Kuriyama, F., Minami, Y. and Kimura, M., Bump plating system, EBARA ENGINEERING REVIEW, No.207 (2005), pp.37-38 (in Japanese).
- 15) Hodai, M., Nakada, T., Kanda, H., Cu interconnect plating system, EBARA ENGINEERING REVIEW, No.207 (2005), pp.30-33 (in Japanese).
- 16) Yuuki, R., Kisu, H., Elastic analysis with boundary element method (1987), Baifukan, pp.165-170 (in Japanese).
- 17) Yuuki, R., Cao, G., Accurate BEM elaststatic analysis for very slender body, BEM, Vol.7 (1990), pp.53-56 (in Japanese).

