めっきの電流分布，膜厚シミュレーション

小 原 勝 彦^a^a ムサシ技研合同会社 (〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 1-7 けいはんなプラザ ラボ棟 2F)

Current Distribution of Electroplating, Simulation of Deposit Thickness

Katsuhiko OHARA^a^a MUSASHI GIKEN LLC. (2F KEIHANNA PLAZA Electronics Laboratory, 1-7, Hikaridai, Seika-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0237)**Keywords** : Electroplating, Secondary Current Distribution, Tertiary Current Distribution, Resistive Electrode, Active Current Density

1. はじめに

初めて有限要素法(FEM)によるハルセルの電流分布解析を行ってから早 30 年が経とうとしている¹⁾。パソコンで当初は二次元解析がやっとであったが、パソコンの高速化と大容量化と共に計算技法も大きく進歩し、現在ではパソコンで数千万要素(四面体)規模の三次元二次電流分布解析が可能となつて、めっき槽に複雑形状の被めっき物を多数個配置した実用槽の丸ごと解析ができる。また、ここに至るには、三次元 CAD データの取扱が一般化したことも大きく貢献している。プリ・ポストプロセッサで CAD データを読み込んだ場合、形状の再現に問題が生じることが度々あったが、最近ではほとんど完全に再現できるようになってきた。プラめっき製品は薄肉複雑形状で、解析するにはメッシュをこれの外側に作成する必要がある、これが可能なプリ・ポストプロセッサは限られていた。しかし、今では可能なソフトも増えた。さらに、大規模モデルの表示の高速化も見逃せない。解析結果のポスト処理は、モデルの回転、移動、拡大、縮小などの操作が付いて回り、大規模モデルの高速描画が求められる。このような多方面の技術が進展して、数千万要素レベルの大規模モデルの解析が実用域に達した。

電解槽の電流分布解析ソフトも各社から販売されるようになり、電流分布に流体と濃度を連成させた三次電流分布が計算できるソフトも出ている。ただこれは電気化学現象の研究には有効であるが、単純形状でも計算量が膨大になるため、実用的にはほとんど使えない。また、実用域での電流分布の問題解決には、たいてい二次電流分布で片が付く。

電流分布解析技術の普及は進んできたことは確かであるが、まだまだ一部の技術者の活用にとまっているのが現状である。しかし、一部企業では、部品の設計段階での活用も進んで大きな成果が出ている。設計段階での活用は、製品のデザイン性向上、製造コストの低減、不良率の低減等へ波及し、成果の度合いも大きい。

電気めっきの膜厚均一化は、様々な要因が絡み合っておりなかなか一筋縄にはいかない。膜厚分布に影響を与える要因

は、カソード形状、槽構造、治具、給電、補助カソード、下地抵抗、アノード、めっき液、添加剤、攪拌などが上げられる。これらの因子が複合して膜厚分布が決まり、実際の膜厚測定結果だけから不均一性の原因を同定することは不可能な場合も多い。電流分布シミュレーション自体は限られた因子しか含まないが、実験にシミュレーションを併用することで、不均一の原因の追及や対策の検討が容易になる。

均一化を議論する際に寸法概念は重要で、ミクロスケールのビアの穴埋めと基板全体に亘るマクロスケールの電流分布は支配している因子に大きな違いがある。また、膜厚の均一化に利用する電流分布改善手法には、遮蔽板、補助カソード、補助アノードなどがある。これらの手法を活用するには、各々の機能と作用を十分理解し、適用することが求められる。本稿では、電流分布シミュレーションを活用しためっき膜厚制御に必要な基本事項と解析方法を概説する。

2. 電流分布シミュレーションの支配方程式

めっき槽の二次電流分布は、境界条件(2)、(3)の下で式(1)のラプラス方程式を解くことで求められる。めっき液中および電極表面の電流密度は、先に求めた電位分布を使って式(4)、(5)から計算される。電流分布解析の詳しい理論的な背景に関しては成書^{2)~5)}を参照して頂きたい。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{めっき槽内} \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\phi = V_e - \eta \quad \text{電極上} \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{絶縁壁上} \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\mathbf{i} = -\kappa \nabla \phi \quad \text{めっき液中の電流密度ベクトル} \cdots \cdots (4)$$

$$\mathbf{i} = -\kappa \nabla \phi \cdot \mathbf{n} \quad \text{電極上の電流密度} \cdots \cdots \cdots (5)$$

 ϕ : 電位 $\mathbf{i}$: 電流密度ベクトル i : 電流密度 V_e : 電極の電位 η : 過電圧 κ : めっき液の電気伝導度 $\mathbf{n}$: 境界上の外向き法線方向の単位ベクトル

3. 電流分布改善手法の解析

電流分布改善手法には、遮蔽、補助カソード、補助アノード等がある。これらの解析方法と基本的な機能を二次元の簡単なモデルで解説する。

解析モデルは、実験槽での硫酸銅めっきを想定し、遮蔽と補助カソードを組み合わせて使用した場合で、遮蔽の被りの変化が電流分布に与える影響を調べる⁶⁾。図1(a)に解析モデルを、図1(b)に解析のメッシュ分割図を示す。解析モデルは、二次元で槽の対称性から第1象限を解析領域としている。メッシュ分割図上部の円形部分が、チタンケースに入った銅ボールをモデル化したアノードである。平板のカソードが下端にある。遮蔽をカソードの端部にコの字型に設置し、裸治具(補助カソード)がカソードの端から7 mmの位置にある。遮蔽条件は、遮蔽なし、被り0, 10, 20, 30 mmに変化させる。被り寸法は、遮蔽板のカソード端から内側への重なりである。

図2にカソード端部の等電位線図に電流ベクトルを上書きした図を示す。遮蔽で電流の流れ方向が変えられ、補助カソードおよび基板端で電流集中が緩和されている。さらに、補助カソードが無い場合は基板端に電流集中が起きるが、基板端より補助カソードに電流集中している。このように遮蔽と補

助カソードが電流の流れに与える影響を視覚的に捕らえることができる。カソードと補助カソードの電流分布のグラフを図3に示す。横軸の165 mmの位置がカソード端であり、その右側の電流密度が高い部分が補助カソードである。遮蔽はカソード端から中程度の範囲で電流密度を低下させ、補助カソードはカソード端の電流を食い狭い範囲で大きな影響を与えている。遮蔽と補助カソードを組み合わせて使用することで、平板であれば全面にわたってほぼ均一な膜厚分布を得られることが分かる。さらに、遮蔽が補助カソードの電流密度を大きく低下させる効果も分かる。

また、補助アノードは、電流が小さい領域の近傍に配置し、その領域の電流を増加させる。このように電流分布改善手法は、それぞれ電流を減少させるとか増加させるとかの機能があり、目的に合わせて使い分ける。

4. 抵抗体電極の解析

解析では、一般的にめっき液部分のみをモデル化しメッシュを作成して計算する。これは、電荷移動が生じている被めっき物表面への給電が理想的になされている、いわゆる治具と被めっき物の抵抗の影響がないことを仮定している。しかし、実際はこれらの抵抗が無視できない場合もある。前記二つの抵抗が無視できない場合の解析を紹介する。

図1 解析モデル
(a)モデルのアウトライン、(b)メッシュ分割図

図2 実験槽の解析結果(等電位線図、電流のベクトル表示)
(a)遮蔽なし、(b)被り10 mm、(c)被り30 mm

図3 実験槽のカソードと補助カソードの電流分布

4. 1 治具抵抗の影響

治具抵抗を解析に取込むには次記のような方法がある。

- (a) 解析モデルに治具形状も作成し、治具を含めめっき液と一括計算する。
- (b) 治具をいくつかのパートに分け、それぞれに対して等価抵抗を設定して、解析モデルにこれらの等価抵抗を組み込む。
- (c) 治具に流れる電流を仮定し、被めっき物の電位を計算し、これらを解析モデルの被めっき物に設定する。

最も容易な方法は(b)と思われるが、ここでは現象を理解するために(c)の方法を解説する⁷⁾。

プリント配線板製造ラインのパネルめっきにおいて、一般に使用されている治具構造を図4(a)に示す。材質は、縦棒がCu/SUSクラッド材、横棒およびバネ部分がSUS材を想定した。この治具の左半分を単純化し描いた等価回路を図4(b)に示す。 $R_1 \sim R_7$ は、各部の抵抗値で諸寸法および材質から算出する。 $i_1 \sim i_8$ は各々の基板から治具に流れ込む電流を表している。治具内の電位と電流に対して次のように仮定する。

- 1) 電流はすべて基板に流れ込んでいるとし、治具へ直接流

れる電流を無視する。

- 2) 個々の基板内部は等電位とする。

- 3) 1枚の基板に流れ込む電流を90Aとする。

これらの仮定から次の(6)～(13)式が得られる。

$$R_4 i_1 + R_2 (i_1 + i_3) = R_5 i_2 + R_2 (i_2 + i_4 + i_5 + i_7) + R_1 (i_2 + i_4 + i_5 + i_6 + i_7 + i_8) \quad (6)$$

$$(R_3 + R_6) i_3 - R_4 i_1 = R_7 i_4 + R_3 (i_4 + i_7) - R_5 i_2 \quad (7)$$

$$R_4 i_5 + R_2 (i_2 + i_4 + i_5 + i_7) = R_5 i_6 + (R_1 + R_2) (i_6 + i_8) \quad (8)$$

$$R_6 i_7 + R_3 (i_4 + i_7) - R_4 i_5 = (R_7 + R_3) i_8 - R_5 i_6 \quad (9)$$

$$i_1 + i_2 = 90 \quad (10)$$

$$i_3 + i_4 = 45 \quad (11)$$

$$i_5 + i_6 = 90 \quad (12)$$

$$i_7 + i_8 = 45 \quad (13)$$

この一次連立方程式を解き、各部に流れる電流を求め、これらの電流値から治具抵抗により各部位に生じる電位を求める。電流分布の解析を行うめっき槽を横断面と縦断面に分離して考え、FEMによる二次元解析を行う。ここでは、横断面の解析を紹介する。解析の横断面は、槽の対称性から図5に示すように1/4断面である。治具抵抗を考慮しない場合は基板と治具の電位を0Vに、抵抗を考慮する場合は基板、治

図4 治具の構造と等価回路
(a) 構造, (b) 等価回路

図5 解析のメッシュ分割図

具の各部の電位を先に計算した電位、すなわち図5に示すように値に設定する。ただし、これらの電位は治具の上段の基板のものである。解析では、遮蔽板の基板との被りを順次変化させ電流分布の変化を調べる。遮蔽の被り0 mmは外側より基板端まで遮蔽があり、-20、-40、-70 mmは遮蔽の基板への外側からの被り代で基板端より外側にある。横断面の治具抵抗を考慮しない場合とした場合の基板端の電流分布のグラフを図6に示した。

この治具の場合には、各部の寸法および材質の影響により治具と基板で200 mV程度の電位差が生じている。このカソード内部の電位差が、図6の抵抗の有無しで分かるように電流分布に大きな影響を与える。治具設計においては、各部の寸法や材質に注意してカソード内の電位差を小さくするように設計する必要がある。また、電流分布には、遮蔽とか抵抗の影響が複合した結果として出てくることが良く分かる。

4.2 下地抵抗の影響

抵抗体電極の事例として他に半導体のダマシんめっきとかプラめっきの無電解ニッケル上への電気銅めっきのような薄膜上への電気めっきがある。

筆者らは、この薄膜(抵抗体電極)に相当する要素と電解液要素の間に、めっき皮膜に相当する堆積要素と過電圧を表す過電圧要素を考案し、配置した⁸⁾。堆積要素は、その要素に流れ込んだ電流量に相当する膜厚を持つ。また、堆積要素に

は析出する銅の電気伝導度が必要で、実際にめっきにより析出した皮膜の電気伝導度を測定した値を膜厚の関数として計算で使用した。堆積要素の導入により、めっきの析出状況によって変化する電極自体の抵抗を考慮した膜厚を、時間を追って計算できるようになった。

矩形槽で銀インクシート(80×100 mm, 200 mΩ/□)に液面から給電し硫酸銅めっきした場合の電流分布の時間変化を図7(a)、膜厚比の時間変化の実験と計算の比較を図7(b)に示す⁸⁾。電流分布は、めっき初期給電部(液面)の電流が高いが時間の経過と共に均一化している。さらに、膜厚比も時間の経過と共に均一化している。これは、銅めっき膜厚が増加して電極抵抗の影響が小さくなっていることに起因している。

電極抵抗の影響は、めっき液の電気伝導度が良いほど大きく出てくる。均一電着性を向上させるには一般的に電気伝導度を高くするが、電極抵抗が大きい場合は逆に作用することになる。

5. パターンめっきの解析

半導体パッケージ用の基板などレジストで微細配線パターンが描かれた基板をめっきする場合のシミュレーション方法と解析事例を紹介する⁹⁾。微細配線パターンを有する基板では、

図6 基板の横断面の電流分布
(a) 治具抵抗無し, (b) 治具抵抗有り

図7 抵抗体電極の電流と膜厚の時間変化
(a) 電流分布, (b) 膜厚分布比

パターン形状のサイズが $10\ \mu\text{m}$ のオーダーであり, 基板サイズは $100\ \text{mm}$ のオーダーなので, 大きさの違いが 10^4 もある。したがって, パターン形状をそのまま再現したメッシュを基板全体に生成すると解析規模が膨大になり, こうした解析は実用上不可能である。そこで, 解析領域を基板スケール, パターンスケール, 形状スケールの三段階に分けて, 基板スケールでは微細形状を無視した解析を行う必要がでてくる¹⁰⁾。

パターンスケールとは, ウエハとかパッケージ基板で $10\ \text{mm}$ オーダーの大きさである。基板全体には, このパターンスケールを一つの単位として, 同スケール内の微細構造が繰り返される。パターンスケールの膜厚の不均一は, パターン密度の不均一に起因していることが大である。均一性の向上には, パターン密度の不均一性を改善するためにダミーめっきを配置する。

S. Mehdizadeh らがパターンスケールの膜厚分布を計算するために, パターン率(めっき部の全面積に対する割合)の概念を導入して, 微細なパターン形状を無視した巧みな解析手法を提案している¹¹⁾。この手法はパターンスケールと基板スケールの解析で活用することができる。

5. 1 パターン率の定義

レジストで微細パターンが形成された平面電極でパターン率 α を式(14)のように定義する。見掛けの面積 A_{SUP} は, 電極の巨視的な面積で, パターンニングあるいは表面粗さによる小さな表面形状の存在を無視している。実際の面積 A_{ACT} は, めっきする部分の面積で電極表面のパターンニング形状部分はカウントするが, 微小な粗さに起因する面積はカウントしない。パターン率の事例を図8に示す。

$$\alpha = A_{\text{ACT}}/A_{\text{SUP}} \quad \text{.....(14)}$$

α : パターン率

A_{ACT} : 実際のめっき面の面積

A_{SUP} : 微細形状を無視した見掛けの面積

次に, パターンニングされた電極表面の電流密度を定義する。見掛けの電流密度 i_{SUP} は, 見掛けの面積 A_{SUP} 上の単位面積あたりの電流密度である。実際の電流密度 i_{ACT} は, 実際の面積 A_{ACT} 上の単位面積あたりの電流密度である。したがっ

図8 パターン率の例

(Reproduced by Permission of the Electrochemical Society)

て, 実際の電流密度と見掛けの電流密度との関係は, パターン率 α を使って式(15)のように表すことができる。

$$i_{\text{ACT}} = i_{\text{SUP}}/\alpha \quad \text{.....(15)}$$

i_{ACT} : 実際の電流密度

i_{SUP} : 見掛けの電流密度

これの物理的な解説を図9に示す。円内の拡大図は, 電極表面とそれからある離れた所までの電流線図である。電極表面からある距離(図の点線)を越えると電流線は等間隔になり, 電極表面(図の下部)の不連続なレジストの分布が電流分布の不均一をどこまでも引き起こすわけではない。この位置における電流線の間隔が, 見掛けの電流密度 i_{SUP} に相当する。電流線は, 電極表面に近づくとき曲がり, レジストとレジストの隙間のめっき部に集中する。この電流線の狭い間隔が実際の電流密度 i_{ACT} を表している。

パターン率を使用した解析における境界条件は, 式(2)が式(16)のように修正される。ただし, ここの過電圧式は, 裸の平面電極表面で測定した分極特性から得られたものである。見掛けの電流密度は式(17)から求められ, 実際の電流密度 i_{ACT} は, 式(15)の関係式から決定される。式(16)は, パターンニングされていない平らな電極部分では $\alpha = 1$ なので $\eta(i_{\text{ACT}}) = \eta(i_{\text{SUP}})$ となり式(2)に一致する。

$$\phi = V_e - \eta(i_{\text{ACT}}) \quad \text{電極上.....(16)}$$

$$i_{\text{SUP}} = -\kappa \nabla \phi \quad \text{見掛けの電流密度.....(17)}$$

よって, 微細形状を無視しパターン率を使用した計算は, 形状を簡略化した部分の境界条件である過電圧式の電流密度に実際の電流密度 i_{ACT} を使用することで実現できる。この部分の形状は簡略化することができるので, メッシュ分割作業が容易になり, さらにメッシュ数も大幅に削減できる。図8

図9 見掛けの電流密度 i_{SUP} と実際の電流密度 i_{ACT} の関係

(Reproduced by Permission of the Electrochemical Society)

図 10 解析モデルのアウトライン

図 11 メッシュ分割図
(a)基板スケール, (b)パターンスケール

に示すようにレジストがある微細配線部分のパターン率は $\alpha < 1$ であり、ビアやスルーホールがある部分は、見掛けの面積より実際の面積が大きくなるので $\alpha > 1$ である。

5. 2 解析の概要

パッケージ基板(サイズ $510 \times 340 \text{ mm}$ 、製品サイズ $44 \times 44 \text{ mm}$ 、ライン幅 $40 \mu\text{m}$) 1 枚を実験槽でめっきした場合の基板及びパターンスケールの解析を紹介する。めっき槽は図 10 に示すような構造で、両側にアノード、中央に遮蔽ボックスがある。この図は槽の長手方向の中央を対称面とした槽の 1/2 モデルである。めっきでは、ステンレス製の裸治具に基板を固定し、これを遮蔽ボックスの中央に配置する。めっき液は、硫酸銅濃度が低く硫酸濃度が高いハイスロー浴である。

5. 2. 1 基板スケールの解析モデル

基板スケールの解析では、図 11 (a) に示すように四面体要素でメッシュ切りした。メッシュサイズは基板部 1 mm 、治具 2 mm 、遮蔽ボックス 5 mm 外形 15 mm である。パターン率は、パターン部、ダミー部、全面めっき部の三種類の値を基板のそれぞれの部位に設定した。

5. 2. 2 パターンスケールの解析モデル

解析モデルの大きさはサイズ $44 \times 44 \text{ mm}$ 、カーブ数 22,000、サーフェイス数 1,700 ほどである。これらの数字はダミーめっき部分の形状をパターン率で簡略化した場合の値である。サーフェイス数が多くさらに入れ子構造になっているのでメッシュ作成作業はかなり面倒である。配線パターン

図 12 基板サイズの解析結果
(a)電位のコンタ図, (b)カソードの電流分布,
(c)基板の膜厚分布

図 13 パターンスケールの解析の膜厚分布

部にメッシュサイズ $40\ \mu\text{m}$, ダミーめっき部分に $80\ \mu\text{m}$ で四角形要素を生成し, これらの要素を引き伸ばして図 11 (b) に示すような六面体要素の解析モデルを作成した。カソードとアノードの極間距離 $5\ \text{mm}$ をバイアス 100 で 5 分割した。

5. 3 解析結果

基板スケールを解析した結果の電位のコンタを図 12 (a) に示す。カソード(基板+治具)の電流密度のコンタを図 12 (b) に示す。治具や給電部の形状が基板の電流分布へ与える影響がよく分かる。基板の膜厚分布のコンタを図 12 (c), パターンスケールの解析の膜厚のコンタを図 13 に示す。このようにパターン率を使用すれば複雑形状を単純形状に置換えて解析ができ, 大幅に解析の労力を低減できる。解析目的からすれば, この単純化が適用できるケースも多い。

6. 濃度過電圧の影響

めっき槽の槽電圧と全電流の関係は, 模式的に図 14 のように表される¹²⁾。ここで槽電圧 V は, めっき液のオーム損 $\Delta\phi_{\text{ohm}}$, カソードの表面過電圧 η_c および, 濃度過電圧 η_c の和である。アノード側の過電圧は示していない。図 14 の場合では電流が $7\ \text{A}$ 位まで過電圧を表面過電圧だけで近似できるが, 電流がそれ以上になると濃度過電圧が漸次増大し濃度過電圧を無視できなくなる。

一般的な電気めっきにおいては十分な攪拌を与えられており, 電極表面での濃度拡散層の厚みが問題になることはあまりない。しかし, 金属イオン濃度が低いめっき液や限界電流に近い電流でのめっきの場合は, 拡散層の厚みが厚くなり濃度過電圧が無視できないほど大きくなる。回転ディスク電極における濃度分極補正や回転形ハルセルの三次電流分布解析に関しては拙稿¹³⁾を参照して頂きたい。

一般の電気めっきでは, 過剰な攪拌を与えることで濃度過電圧の増大を抑えている。また, ある種のめっきでは, 攪拌を弱くして濃度過電圧の増大を利用して電流分布の均一性を得る場合もある。

7. まとめ

電流分布シミュレーションとの係りの中でめっき槽, 電流分布改善手法, 治具, 攪拌, 解析手法等を概説した。本稿が,

図 14 槽電圧の構成

さらなる電流分布解析の活用につながる端緒になれば幸いである。

めっき製品の設計段階でのシミュレーション活用は波及効果大きい。効果は, 製品のデザイン性向上, 製造コストの低減, 不良率の低減等が挙げられる。さらに, めっきの設定電流, めっき時間等の操作条件, 被めっき物の槽内配置が決まれば治具設計やめっきの見積り精度の向上になる。

また, 装置設計においても過去のめっき槽の構造が踏襲され, 電流分布に悪影響を与えている事例も散見される。まだめっき槽の構造に最適化の余地は残っており, めっき装置の更新時にはシミュレーションを活用し, 槽の最適化を計れば効果も大きい。まだまだ十分に活用されているとは言えない現状があり, さらなる今後の進展に期待したい。

(Received August 15, 2017)

文 献

- 1) 小原勝彦, 岡田真明, 松井富士夫; 第82回講演大会講演要旨集, p.57 (表面技術協会, 1990).
- 2) J. S. Newman; Electrochemical Systems, p. 369 (John Wiley & Sons, 2004).
- 3) 外島 忍, 佐々木英夫; 電気化学, p. 259 (オーム社, 1987).
- 4) 近藤和夫; 初歩から学ぶ微小めっき技術, p. 82 (工業調査会, 2004).
- 5) 日根文夫; 電気化学と電解槽の工学, p. 96 (化学同人, 2014).
- 6) 小原勝彦, 畑瀬 博, 櫻井達美; 表面技術, 47, 751 (1996).
- 7) 小原勝彦; 第87回講演大会講演要旨集, p.196 (表面技術協会, 1993).
- 8) 川崎正悟, 小原勝彦; 回路実装学会誌, 11, 500 (1996).
- 9) 小原勝彦; 表面技術, 61, 366 (2010).
- 10) H. Gerischer, C. W. Tobias, J. O. Dukovic; Advances in Electrochemical Science and Engineering, Volume 3, p. 122 (VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1994).
- 11) S. Mehdizadeh, J. O. Dukovic, P. C. Andricacos, L. T. Romankiw, H. Y. Cheh; J. Electrochem. Soc., 138, 78 (1992).
- 12) J. S. Newman; Electrochemical Systems, p. 23 (John Wiley & Sons, 2004).
- 13) 小原勝彦; 表面技術, 64, 539 (2013).