薄膜ドライフィルムレジストを利用した高密度ビルドアップ基板エッチングプロセス解析

乃万 裕一*, 中西 徹*

Etching Process Analysis for High Density Build-up Substrate by Thin Dry Film Resists

Hirokazu NOMA* and Tohru NAKANISHI*

*日本アイ・ビー・エム株式会社エンジニアリング&テクノロジー・サービス (〒520-2392 滋賀県野洲市市三宅800)

*Engineering & Technology Services, IBM Japan, Ltd. (800 Ichimiyake, Yasu-shi, Shiga 520-2392)

概要 ビルドアップ基板における低価格と高密度の両立を目指し、薄膜ドライフィルムレジストを用いたサブトラクティブ法による微細配線の形成を、実験と理論計算の両面から検討した。厚さ15 μm 、10 μm のレジストを用いた場合について、ライン幅/スペース幅が30/50、27/43 μm （銅厚20 μm 、アンカー深さ2.8 μm ）の配線の量産可能性を確認した。エッチング液が配線に沿った方向へ流れる場合について、配線の形状を理論計算で求めた。理論計算から、銅厚20 μm 、アンカー深さ2.8 μm 、レジスト厚15 μm の場合において、形成可能な最小ピッチを、銅厚、レジスト幅、エッチング速度のばらつきの1次関数で近似した。

Abstract

Dry film resists are evaluated with theoretical calculations and hardware experiments for the simultaneous pursuit of high density and low cost of printed circuit boards. Circuits whose line/space widths are 30/50 and 27/43 μm (Cu thickness 20 μm , anchor depth 2.8 μm) are formed experimentally with 15 and 10 μm -thickness resist. In theoretical calculations, the copper shape due to etchant flow along lines was calculated. The minimum pitches of lines formed by the subtractive method were obtained from theoretical calculations as a linear function of the variation of processes under conditions where the Cu thickness is 20 μm and the anchor depth is 2.8 μm .

Key Words: Wet Etching, Dry Film Resists, $\text{CuCl}_2\text{-HCl}$ Solution, Mass Transfer, Pattern Fabrication

1. 緒言

半導体チップの高集積化に伴い、半導体チップ間を接続するビルドアップ基板においても、配線のさらなる高密度化が要求されている。ビルドアップ基板において、スルーホールを持つ配線は、主にサブトラクティブ法によって形成される。サブトラクティブ法のためのレジストには、電着レジストとドライフィルムレジストがある。電着レジストは厚さが6 μm と薄いため解像度が高く、より微細な配線を形成できる長所がある¹⁾。しかし、電着レジストにはドライフィルムレジストと比べ高価であるという短所がある。

サブトラクティブ法での回路形成における最大の障害はサイドエッチである。サイドエッチとは、銅厚方向へエッチングする間に、レジスト膜の下側で銅厚と垂直な方向へもエッチングされることである。サイドエッチが大きいと、レジストと銅表面の密着幅が狭くなり、エッチング液中でレジストがはく離する¹⁾。はく離を防ぐには配線幅を太く設計する必要があるため、微細化への障害となっている。また、めっき、露光・現像、エッチングのプロセスのばら

つきも高密度化への障害となっている。プロセスのばらつきの改善には多大な労力がかかるため、改善するプロセスの決め方が、高密度ビルドアップ基板の開発効率に大きく影響する。

サイドエッチやプロセスのばらつきの障害を克服し、より高密度な回路を形成するには、エッチング現象を正確に捉え理論付けることが重要である。エッチングの理論計算については数件の報告がある^{2)~4)}。しかし、これらの理論計算には、実験との比較がない²⁾、エッチング液の流動を無視している³⁾、レジストの厚さを無視している⁴⁾という特徴があり、理論計算を適用できる条件は限られていた。

そこで、ビルドアップ基板における低価格と高密度の両立を目指し、厚さ15 μm と10 μm の薄膜ドライフィルムレジストを用いたサブトラクティブ法による微細配線の形成を、実験（2章）と理論（3章）の両面から検討した。理論計算でエッチング液の流動やレジストの厚さを考慮した結果、エッチングによるライン形状（4章）や形成可能な最小ルール（5章）を理論的に予測する手法を開発できた。この手法を応用すれば、どのプロセスを改善すればビルドアップ基板の高密度化へ最も有効かが推定できる。

Table 1. Process flow for the samples

	Varied conditions	Notes	Measurements/Inspections
Panel before treatment	None	Cu thickness 20 μm Beaten Cu 6 μm (without anchor depth) Plated Cu 14 μm Anchor depth 2.8 μm	None
Laminating resist	Resist thickness 10, 15 μm	None	None
Exposing resist	Width / Space 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70, 100, 150 μm	None	None
Developing resist	None	None	Resist width/space Visual inspection
Etching copper	42, 53, 60, 67 s	Spraying etchant $\text{CuCl}_2\text{-HCl}$ Oscillate once a second	Resist removal
Stripping resist	None	None	Cu width/space Cu thickness Visual inspection

Fig. 1 Schematic diagram of resist pattern

2. 実験

2.1 試料の作成

今回使用した試料のプロセスフローをTable 1に示す。使用したレジストの厚さは15 μm , 10 μm の2種類である。これらのレジストをサイズ0.5m×0.6mのパネルの銅表面へラミネートした。ラミネート後、露光・現像によって、ライン幅とスペースをそれぞれ11種類(10~150 μm)に変化させたレジストパターンを形成した(Fig. 1)。レジストパターンのサイズはすべて1cm×1cmで、パターンの向きは縦横2種類である。時間を42~67秒の4種類に変化させてエッチングすることにより、銅パターンを形成した。エッチングには、量産にも用いられる装置を用いた。パネルはローラーで搬送され、装置内に縦横それぞれ約0.1mの間隔で配置された扇形スプレーノズルから、 $\text{CuCl}_2\text{-HCl}$ 溶液が噴射される。なお、溶液の密度 ρ は $1.24 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度 ν は約 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。スプレーノズルはパネルの進行方向とは垂直に1秒あたり1往復の割合で首振りさせた。最後に、不要になったレジストははく離させた。

また、上記の試料とは別に、エッチング速度の面内分布を求めるため、レジストを貼っていない、表面がすべて銅

のパネルを、上記と同じ装置で34秒間エッチングした。

2.2 試料の測定

2.2.1 プロセスのばらつきの評価と目視検査

露光・現像後に、レジストのスペースのばらつきを調べた。目視検査により、形成可能な最小のレジストライン幅/スペース幅を調べた。エッチング後に、レジストはがれを検査した。レジストはく離後に、銅配線のトップ幅を測定し、エッチング途中でのレジストはがれを防ぐために最低限必要なトップ幅を求めた。目視検査により、形成可能な最小の銅ライン幅/スペース幅を調べた。銅厚を測り、銅厚のばらつきを調べた。

エッチング速度の面内分布を求めるためのパネルについては、エッチングの前後に銅厚を測定し差を求めることにより、エッチング速度のばらつきを算出した。

2.2.2 配線間スペースの測定、傾斜角の算出

スペース幅をトップと BOTTOM について測定し、さらに銅厚も測定することによってライン形状を調べた。測定箇所をFig. 2に示す。測定は、装置の下側からのスプレーによって形成された面のうち、スプレーの首振りと平行な方向のパターンに関して行った。レジストのライン幅150 μm のパターンについて、11種類のスペースをそれぞれ2箇所ずつ

Fig. 2 Measured points.

Resist space is measured after developing.
Copper space (top, bottom) and copper thickness are measured after stripping

測定し、その平均を実験結果とした。アンカーに銅が残った部分はスペースに含めた。さらに、サイドエッチを定量的に評価するため、ライン側面の角度 θ を式(1)に示すように求めた (Fig. 2)。

$$\tan \theta = \frac{(\text{Cu thickness})}{(\text{Top space} - \text{Bottom space})/2} \quad (1)$$

3. 理論計算

流速計算は、スプレーの首振りと平行な向きのパターンに対して行った。

3.1 流速計算

流速計算にあたり、下記の仮定をおいた。

(仮定1) エッチング液は非圧縮性ニュートン流体、物理定数は溶液の密度も含め一定である²⁾。

(仮定2) 溶解の時間スケールに対して流れの時間スケールは非常に小さい。この仮定により、流れ場の計算をくぼみの形成に関する計算と分離し、準定常的に行うことができる²⁾。

(仮定3) 計算を簡略化するため、エッチング液はスペースに沿った方向のみに流れ、それ以外の方向の速度は0と近似する。この仮定によって、エッチング液の流速は、スペースに沿った方向のみ計算すればよいことになる⁴⁾。また、銅パターンの形状の計算も2次元で行える。

(仮定4) エッチング液の流れは層流と仮定する。パネル上におけるエッチング液の主流の速度は $u_{main} = 0.5 \text{ m/s}$ 程度であり、レジスト間スペース S は最大 $150 \mu\text{m}$ であるため、レイノルズ数が $Re = u_{main} S / \nu = 75$ と求まるためである。

(仮定5) レジスト表面から速度境界層厚さ δ_v 以上離れた場所において、エッチング液の速度 u は一定速度 u_{main} である。ここで、 δ_v は一様流れの中の無限平板での境界層厚さの式(2)から $\delta_v = 4.5 \times 10^{-5} \text{ m}$ と求めた。平板の端からの距離として $L = 0.05 \text{ m}$ (エッチング装置のスプレー間隔の半分) を用いた。

$$\delta_v = 5 \sqrt{\frac{\nu L}{\rho u_{main}}} \quad (2)$$

Fig. 3 Calculating area and its boundary conditions

(仮定6) レジスト、絶縁樹脂、銅はすべて完全剛体と仮定する。

まず(仮定1)から、流れ場の基礎方程式として式(3)に示す連続の式と式(4)に示す非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を利用できる²⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

ただし、 x, y, z は Fig. 1, 3 のように設定した座標で、 u, v, w はエッチング液の x, y, z 方向の流速、 ρ, ν, P はエッチング液の密度、動粘度、圧力である。(仮定2)より $\partial u / \partial t = 0$ 、(仮定3)より $v = w = 0$ なので、式(3, 4)から、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho \nu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (5)$$

となる。式(5)において右辺は一定値と考え、 $\partial P / \partial x = 1 \times 10^3 \text{ Pa} / 0.5 \text{ m} = 2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ とみなした。分母はパネルの幅であり、分子は、充円錐スプレーの打力が数百 Pa である⁵⁾ ことと、扇形スプレーが充円錐スプレーより照射面積が小さいことから推定した圧力である。

式(5)への境界条件として、計算領域および流動条件を(仮定4, 5, 6)のもとに Fig. 3 のように設定した。 y 方向に関しては、レジスト開口部が周期的に配置されていることから、周期的境界条件を用いた。レジスト表面、絶縁樹脂表面、銅表面での流速は0とした。これらの条件において、計算領域を1辺の長さ $1 \mu\text{m}$ のセルに分割し、2次の中心差分スキームを用いて解くことによって流速を得た。

3.2 エッチング速度計算

$\text{CuCl}_2\text{-HCl}$ 溶液による銅のエッチングは、下記の2段階の化学反応で起こる。この反応は、第2段階で発生する CuCl_2^- の拡散律速である⁶⁾。

ここで、 CuCl_2^- イオン濃度は、銅表面では飽和濃度 C_{sat} と仮定した。また、溶液濃度の x 方向の分布を無視し、銅表面から濃度の境界層厚さ δ_c 以上離れた部分では CuCl_2^- イオン濃度が0であると近似した。すると、エッチング速度 E は式(6)の形で表せる。

$$E = \frac{DC_{\text{sat}}M}{\rho\delta_c} \quad (6)$$

ただし、 D, M は CuCl_2^- イオンの拡散係数、モル質量である。

無次元物質移動量を示すシャーウッド数 Sh は、式(7)のように定義される⁷⁾。そのため、式(6)は式(8)のように書き換えられる。

$$Sh = \frac{L}{\delta_c} \quad (7)$$

$$E = \frac{DC_{\text{sat}}M}{\rho L} \times Sh \quad (8)$$

ただし、 L は代表長さである。また、平板に平行な層流流れにおけるシャーウッド数 Sh は式(9)で表される⁷⁾。

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (9)$$

ただし、 Re はレイノルズ数、 Sc はシュミット数である。液体の場合、運動量の交換と比べると物質の交換は起こりにくいから、 δ_c は δ_v よりも薄い。そのため、銅表面近傍での流速 u_{surf} をもとに濃度の境界層厚さが決定されると仮定すれば、式(9)における Re は式(10)のように書ける。また、 Sc の定義を式(11)に示す⁷⁾。

$$Re = \frac{u_{\text{surf}}L}{\nu} \quad (10)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (11)$$

上記の式(9, 10, 11)を式(8)に代入すれば、エッチング速度 E は式(12)のように銅表面近傍での流速 u_{surf} の平方根に比例することがわかる。

$$E = \frac{DC_{\text{sat}}M}{\rho L} \times 0.664 \left(\frac{u_{\text{surf}}L}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3} = k \sqrt{u_{\text{surf}}} \quad (12)$$

ただし、 k は比例定数である。 u_{surf} の値としては、対象の銅セルと隣り合うエッチング液のセルの流速を用いた。

隣り合うエッチング液のセルが2つある場合には、その相加平均を u_{surf} とし、 k の値は通常の $\sqrt{2}$ 倍とした⁸⁾。理論計算において、 k の値はレジスト間スペースが広い場合について実験結果を最もよく説明する値、 $2.8 \times 10^{-5} \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1/2}$ に設定した。これは、本論文におけるすべての計算条件について統一した値である。

3.3 形状変化の計算

銅が溶解しパターンが形成される様子は、cell-removal法⁹⁾を用いて調べた。cell-removal法とは、計算領域を正方形の格子に分割し、銅でできた格子のどれか1つが溶けてエッチング液へ変化するたびに、エッチング液の流れの状態を計算しなおす方法である。流速計算の際と同様、セルの1辺の長さが $1 \mu\text{m}$ になるように計算領域を分割した。

銅の格子がエッチング液へ変化するまでの所要時間 dT は、式(12)で得た E をもとに、式(13)から求めた。

$$dT = \frac{V}{E} \quad (13)$$

ただし、 V はセル内に残っている銅の量で、 V の初期値はセルの高さと同じ $1 \mu\text{m}$ である。エッチング液に面したすべての銅セルについて dT を算出し、最も小さい dT つまり $\min(dT)$ を得た。

次に、エッチング開始後の時間 T を dT だけ増やし、銅セルの中で $dT = \min(dT)$ であるセルは状態を銅からエッチング液へ変化させた。他の銅セルについても、銅の量をそのセルでのエッチング速度 E に応じて式(14)のように減らした。

$$V_{T=\min(dT)} = V_{T=0} - E \cdot dT \quad (14)$$

この後、式(5)からエッチング液の流速を新たな銅形状で計算しなおした。計算の初期値は、新たにエッチング液になったセルでは0とし、それ以外のセルには前回の計算で得た流速を用いた。以下、すでに述べた手順を繰り返せば、銅形状の時間による変化が計算できる。

4. 結果と考察

4.1 プロセスのばらつきの評価と目視検査

プロセスのばらつきの評価と目視検査の結果をTable 2に示す。パターンの形成実験によって得た銅厚やレジスト幅のばらつきの結果と合わせ、エッチング面内速度分布の実験の結果もこの表に記載した。エッチング中のレジストはく離防止に必要なライントップの幅(Table 2の Minimum top width of copper line)は、電着レジストの場合 ($7 \mu\text{m}$) とほぼ同等である¹⁾。また、露光・現像後やレジストはく離後の目視検査において、レジストのラインとスペースがともにTable 2の Minimum ruleに記載の幅以上の場合、レジストや銅のパターンが形成されていることが確認できた。なお、レジストはく離後に行った銅ボトムのスペース幅の測

Table 2. Process distribution, adhesion between resist and copper, minimum rule (experimental value)

Thickness of dry film resist	Process variation (3σ)			Minimum top width of copper line	Minimum rule					
	Cu thickness after plating	Resist space after exposing/developing	Etching rate		After developing			After stripping (etching time 53 s)		
					Resist			Resist (Cu bottom)		
					Pitch	Line	Space	Pitch	Line	Space
15 μm	3.0 μm	3.0 μm	13%	8 μm	45 μm	25 μm	20 μm	80 μm	50 μm (30 μm)	30 μm (50 μm)
10 μm		3.4 μm		7 μm	30 μm	15 μm	15 μm	70 μm	50 μm (27 μm)	20 μm (43 μm)

Fig. 4 Cross section of theoretical and experimental pattern (Resist thickness=15 μm , Resist space=20 μm , Copper thickness=20 μm)

Fig. 5 Calculated flow speed (Resist thickness=15 μm , Resist space=20 μm , Copper thickness=20 μm , Etching time=42 s)

定結果を括弧内に示した。厚さ10 μm のレジストが、レジスト幅のばらつきでは厚さ15 μm のレジストより悪いにもかかわらず、より微細な銅配線を形成できるのは、エッチング液の流れの違いによると考えている。

4.2 断面形状、流速分布の例

実験で得た配線の断面写真と、理論計算によって求めた配線形状をFig. 4に示す。ここに示したのはレジスト厚さが15 μm 、レジストスペースが20 μm の場合の結果である。計算結果は、エッチング時間が長くなるにつれてスペースが広がり、ライン側面の傾斜が急である良好な配線形状になることを示している。実験結果と計算結果を比較すると、配線断面の形状が定性的に一致していることがわかる。

また、理論計算によって求めた等流速線の一例をFig. 5

に示す。キャビティ内部では、キャビティ外と比べ流速は非常に遅いことがわかる。また、キャビティ内部での等流速線の形状から、銅トップ部分の近傍では、銅ボトム部分の近傍と比べ流速が遅いことが読み取れる。このことから、銅ボトム部分においては銅トップ部分よりもエッチング速度が速く、エッチング時間の経過とともに銅ライン側面の傾斜が急になることが理解できる。

4.3 配線間スペースの測定、傾斜角の算出

エッチング後のスペースに対するレジスト厚さ、レジスト開口部幅、エッチング時間依存性を、実験結果と計算結果それぞれについてFig. 6に示す。実験結果、計算結果ともにスプレーの首振りと平行な向きのパターンについて示している。横軸はレジスト開口部の幅で、縦軸は銅トップ

Fig. 6 Undercut dependence on resist thickness, resist opening width and etching time (experimental value and theoretical value)

Fig. 7 Line slope angle θ dependence on resist thickness, resist opening width and etching time (experimental value and theoretical value)

またはボトムのスペースの幅からレジスト開口部の幅を引いた値である。言い換えると、Fig. 6(a, b)の縦軸は配線のトップ部分におけるアンダーカット（レジスト下の銅が横方向へエッチングされた長さ）を2倍した値であり、Fig. 6(c, d)の縦軸は銅のボトム部分におけるアンダーカットを2倍した値である。レジスト幅の狭い部分において測定データが示されていない箇所が存在するのは、銅配線同士が重なっていたためである。

下記の傾向がFig. 6から読み取れる。

- エッチング時間とレジスト開口部幅を固定した場合、レジストの厚さが薄いとエッチング量が多くなる。この効果は、レジスト開口部が狭いほど大きくなる。
- エッチング時間とレジスト厚さを固定した場合、レジスト開口部の幅が狭いほどエッチング量は小さくなる。

これらの現象は、レジスト周辺においてはエッチング液の流れが抑制されるため発生すると考えられ、これらの傾

向は理論計算によっても再現できている。

サブトラクティブ法による微細回路の形成には、サイドエッチが少ないラインを作ることが欠かせない。ライン側面の角度 θ に対するレジスト厚さ、レジスト開口部幅、エッチング時間依存性をFig. 7に示す。実験値と理論計算値を比較すると、下記の事項が読み取れる。

- 15 μm 厚さのレジストについては、すべてのレジスト開口部幅において、実験値と理論計算値がほぼ一致している。
- 10 μm 厚さのレジストに関して、レジスト開口部幅が40 μm 以上の場合には実験値と理論計算値がほぼ一致している。
- 10 μm 厚さのレジストに関して、レジスト開口部幅が40 μm 未満の場合には、理論計算によって求めた θ は実験結果よりも悪い値である。

このずれが生じたのは、計算ではレジストのスペースに沿った流れを仮定したのに対し、実際には、スプレー噴射

や重力によってレジストスペースと垂直な方向（Fig. 3のy方向やz方向）にも流れが生じているためと考えている。また、このずれが、レジストが薄くかつレジスト開口部幅が狭い場合についてのみ生じたのは、下記の理由によると考えている。

- レジストの厚さが薄いと、レジストのスペースと平行な方向の流れも速くなるが、スペースと垂直な方向の流速はさらに速くなる。
- レジスト開口部幅が広いと、レジストのスペースに沿った流速は非常に速くなるため、スペースと垂直な方向の流れはほぼ無視できる。

以上から、15 μm 厚さのレジストについて今回のモデル式(5, 12, 14)によって銅配線形状を算出できることが明確になった。

5. 形成可能最小ルールのプロセスのばらつきへの依存

銅厚20 μm ，アンカー深さ2.8 μm の場合について、15 μm 厚さのレジストによって形成可能な最小ルールを下記の条件を用いて推算した。

- アンカー内の銅のエッチングには、アンカー深さの

1.7 倍の厚さの銅をエッチングするだけの時間がかかることが、別の実験から求まった。電氣的信頼性のため、アンカー内の銅が完全にエッチングされた領域は15 μm 以上必要であると仮定した。

- プロセスのばらつき、銅配線の最低限必要なトップ幅、露光・現像で形成可能な最小のレジスト間スペースは、Table 2に示した値を使う。

最小ルールのプロセスのばらつき依存をTable 3に示す。現状のプロセスのばらつきでの最小ピッチは、計算では75 μm であり実験での80 μm と比べ良い値であった。これは、実験でのレジストパターンのピッチが5~50 μm 刻みであるのに対し、計算では1 μm 刻みに設定できるためと考えている。

形成可能最小ルールへ与えるプロセスのばらつきの影響は、銅厚、レジスト幅、エッチング速度の中で、レジスト幅が最も大きいと推定できる。

さらに、形成可能最小ピッチを、さまざまなプロセスのばらつきのもとに推算した。銅厚(3 σ =0, 1, 2, 3 μm)、レジスト幅(3 σ =0, 1, 2, 3 μm)、エッチング速度(3 σ =0, 4, 8, 13%)を括弧内に示した4条件に変化させ、合計64条件について行った結果をFig. 8に示す。今回の操業条件・計算範囲で

Table 3. Minimum design rule (line and space width) dependence on process variation (theoretical value)

Process variation			Cu minimum rule (resist thickness 15 μm)		
Cu thickness	Resist width	Etching	Pitch	Bottom line	Bottom space
+/-3 μm	+/-3 μm	+/-13%	75 μm	28 μm	47 μm
+/-0 μm	+/-3 μm	+/-13%	72 μm	32 μm	40 μm
+/-3 μm	+/-0 μm	+/-13%	59 μm	23 μm	36 μm
+/-3 μm	+/-3 μm	+/-0%	70 μm	27 μm	43 μm
+/-0 μm	+/-0 μm	+/-13%	56 μm	27 μm	29 μm
+/-0 μm	+/-3 μm	+/-0%	67 μm	31 μm	36 μm
+/-3 μm	+/-0 μm	+/-0%	55 μm	23 μm	32 μm
+/-0 μm	+/-0 μm	+/-0%	52 μm	27 μm	25 μm

Fig. 8 Minimum pitch dependence on process distribution (theoretical value) under condition that (a) $3\sigma_{Cu}=0\mu\text{m}$, $3\sigma_{resist}=0\mu\text{m}$ or $3\sigma_{etching}=0\%$, (b) $3\sigma_{Cu}=3\mu\text{m}$, $3\sigma_{resist}=3\mu\text{m}$ or $3\sigma_{etching}=13\%$

は、形成可能最小ピッチは銅厚，レジスト幅，エッチング速度の1次関数として近似できることがわかった。多変量解析によって近似式を求めると，

$$\text{Minimum Pitch } (\mu\text{m}) = 50.4 \mu\text{m} + 1.2 \times 3 \sigma_{Cu} (\mu\text{m}) + 5.1 \times 3 \sigma_{\text{resist}} (\mu\text{m}) + 0.37 \mu\text{m} \times 3 \sigma_{\text{etching}} (\%) \quad (15)$$

となる。ただし， σ_{Cu} ， σ_{resist} ， σ_{etching} はそれぞれ銅厚，レジスト幅，エッチング速度の標準偏差である。この式(15)によって，銅厚，レジスト幅，エッチング速度のばらつきをどの程度改善すれば，どの程度のピッチの配線が得られるかを推測できる。

6. 結 論

厚さ $15 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ の2種類の薄膜ドライフィルムレジストを用いたエッチング実験を行い，銅厚 $20 \mu\text{m}$ において，それぞれライン幅／スペース幅が $30/50 \mu\text{m}$ ， $27/43 \mu\text{m}$ の配線の量産可能性を確認した。また，今回のモデルによる理論計算値は $15 \mu\text{m}$ 厚さのレジストについて実験結果とほぼ一致した。銅厚，アンカー深さ，プロセスのばらつきを与えれば，エッチングで形成が可能な最小ルールを推算できる。

(2004.1.21-受理)

文 献

- 1) 武内 浩，水本尚吾，塚田 裕：“ビルドアップ配線板におけるファインピッチ配線の形成”，第8回マイクロエレクトロニクスシンポジウム，pp. 185-188, 1998
- 2) 西中川 遵，杉野文弘，宮崎 武：“エッチング加工法における流動現象”，ながれ，Vol. **20**, No. 2, pp. 116-126, 2001
- 3) 船橋真吾，松本克才，谷口尚司，菊地 淳：“塩化第二銅溶液及び塩化第二鉄溶液による回路用銅箔のウェットエッチング特性”，第10回マイクロエレクトロニクスシンポジウム，pp. 243-246, 2000
- 4) T. Hayashi: “The Modeling and Formulation of Etching Rate Based on Hydrodynamics Theory”, 2003 International Conference on Electronics Packaging, pp. 193-198, 2003
- 5) 上田龍二，朝倉祝治，田野崎芳夫，杉浦猛雄：“塩化第二鉄溶液のスプレーエッチング速度の解析”，表面技術，Vol. **43**, No. 10, pp. 946-951, 1992
- 6) 松本克才，荒井秀幸，谷口尚司，菊地 淳：“ $\text{CuCl}_2\text{-HCl}$ 溶液による銅のエッチング速度”，エレクトロニクス実装学会誌，Vol. **5**, No. 1, pp. 35-41, 2002
- 7) 伊藤公久：“マテリアルサイエンスの基礎 速度論”，八千代出版，2003
- 8) Y. Hirai, S. Tomida, K. Ikeda, M. Sasago, M. Endo, S. Hayama and N. Nomura: “Three-Dimensional Resist Process Simulator PEACE (Photo and Electron Beam Lithography Analyzing Computer Engineering System)”, IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. **10**, No. 6, pp. 802-807, 1991