

マイクロコイルを用いた材料診断技術の開発に関する研究(第1報) 厚膜フォトレジスト転写条件の最適化に対する品質工学の適用

問山清和, 山下弘之, 縄稚典生

Development of new technique for material testing using microcoil (1st report)
Optimization of operating condition for lithographing thick photoresists using Taguchi Method
TOIYAMA Kiyokazu, YAMASHITA Hiroyuki and NAWACHI Norio

Lithographing thick photoresist is an element technique to fabricate the micro structures such as sensors and coils. In the paper, an optimization of lithographing thick photoresist process was carried out with the help of Taguchi Method. By the optimization, the size precision was successfully improved, resulting that 20 μm -fine and 15 μm -thick pattern could be formed with a good sharpness.

1. 緒言

我々は微細加工技術の応用展開の一例として、非破壊で探傷・材料診断などを行う電磁超音波センサ(EMAT)の開発を目指している。EMATは大きく分けて平面型コイル部と永久磁石部とから構成されており、本年度はEMAT用平面型マイクロコイル作製に要する要素技術の確立を行った。図1にマイクロコイル作製プロセスの概要を示す。このプロセスは通常プリント基板作製に用いられるエッチング法とは異なり、厚膜レジストで予め型を作製しておき、後で金属を埋め込む組み上げ式の手法をとるのが特徴である。本報告では、この中で特に厚膜フォトレジストに対する光転写技術について、品質工学の手法を用いて効率的に条件最適化を行った結果について報告する。

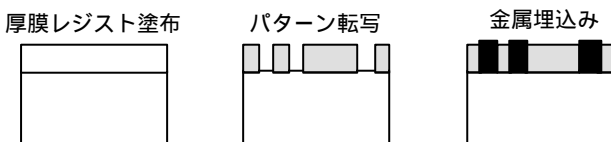


図1 マイクロコイル作製プロセスの概要

2. 技術の概要

本研究で扱う厚膜フォトレジストの厚さは15~20 μm あり、通常の薄膜フォトレジスト(~1 μm)の光転写技術に比べ以下のような取り扱いの難しい点がある。

1. 転写パターンの平面形状について、特に直角コーナー部のシャープさが無くなり丸みを帯びる。
2. 転写パターンの断面形状について、膜の上部に比べ下部が狭まったテーパ形状をとる。

これらの不具合は、その後の金属埋め込み工程によってそのままコイル線形状に転写され、コイルの電気特性(抵抗, 静電容量, インダクタンス)のばらつき要因となり、最終的にはセンサーとしての機能を低下させるおそれがある。

そこで、この厚膜フォトレジストの光転写技術については、「レジストパターンの2次元形状が設計通りに転写され、かつ断面がなるべくテーパのない垂直に切

れた形状になる」ための、安定した転写条件を見いだすことが重要である。

3. 実験計画

3-1 基本機能

品質工学においては、まず基本機能というものを定義するところから出発する。基本機能とはその技術の最も根本をなす法則のことであり、実際にはシステム(製造工程など)の理想的な入出力関係; 入力Mに対する出力Yとの比例関係がよく用いられる。この法則を十分確立するよう条件を調整することにより、結果的に品質の良い製品が得られるとされるものである。¹⁾

ここでは、従来の薄膜レジストのような2次元転写性²⁾をもとに、転写パターン断面のテーパ角など、膜の高さ方向の情報も評価の対象としたいいわゆる2.5次元転写性として、次のような基本機能を設定した。「膜厚の大小にかかわらず、パターンの断面がなるべく垂直に切れており、かつ設計寸法とレジストパターン寸法とが比例関係にあること」

$$y = M$$

y: レジストパターンの実寸法(特性値)

M: 設計寸法(信号因子)

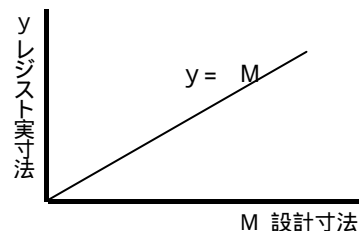


図2 基本機能のグラフ

3-2 特性値

特性値yには、レジスト断面形状のテーパ角の大きさを評価に入れる目的で、図3(c)に示すように、上寸(y₁)、下寸補正値(y₂)の2通りを設定した。後で述べるSN比の計算には、その両方の特性値を用いることとした。

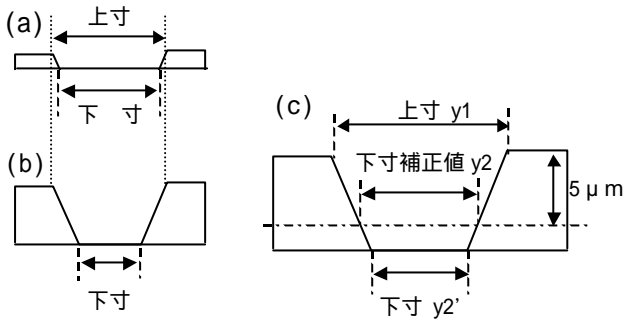


図3 レジスト下寸に関する模式図

(a) 薄い場合, (b) 厚い場合, (c) 下寸補正値の定義

ここで y_2 として, 下寸ではなく下寸補正値を用いている理由について述べる。図3の(a)(b)は, 同じテーパ角度を持ちかつ膜厚の異なるパターン断面の模式図である。薄い膜の時は下寸は上寸とほぼ同じ値をとるのに対し, 厚い膜の場合は上寸に対しても小さな値をとるであろう。ここで特性値として膜厚を考慮しない単純な上寸と下寸を用いた場合, 同じテーパ角であるにも関わらず厚い膜の方は薄い膜よりも相対的に悪い評価をしてしまう事になる。そこでこのような膜厚の大小による評価の差をなくすため, ここでは図3(c)に示すような, 膜厚を $5\mu\text{m}$ と仮定したときの現状ある寸法から推定される下寸の補正値 y_2 を算出し, これを特性値の1つとして用いた。

3-3 信号因子

信号因子Mには設計寸法を用いた。図4に示すように, 1つの線幅 d に対し からの8ヶ所を設定し, それぞれ $d=15, 20, 25, 30\mu\text{m}$ について, 計 $4 \times 8 = 32$ 水準を設定した。

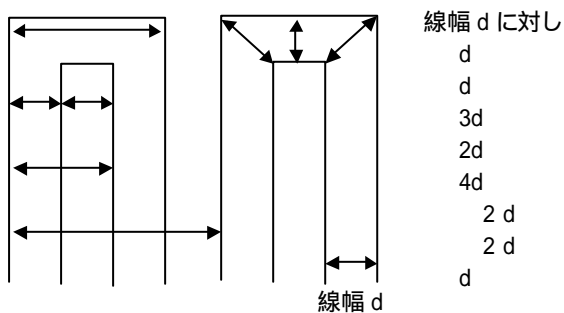


図4 信号因子の設定

3-4 寸法の測定方法

上寸・下寸の測定は, 光学顕微鏡でレジスト膜の上・下それぞれに焦点を合わせて写真撮影し(倍率500倍), その後写真をもとに採寸した。レジストの膜厚は触針式段差計にて, 触針圧を最小にしてレジストの変形を最小限に抑えた状態で測定した。

3-5 制御因子

制御因子とは, 制御を行う実験条件のことである。ここでの制御因子は, 表1に示すような前処理・ベーク・露光・現像に関する条件を割り当てた。ここで因子E(ポストベーク時間)については, 因子D(ポストベーク温度)との交互作用が予想されるため水準ずらしを行っている。水準ずらしは, ベーク時にオープンから与えられる熱量を一定にするという条件の下で行った。これらの制御因子を表2のような L_{18} 直交表に割り付けて18通りの実験条件を設定した。

表1 制御因子とその水準

	第1水準	第2水準	第3水準
A. 現像液の種類	P-7G	NMD-3	
B. 基板洗浄方法	純水のみ	水, アルコール, アセトン	水セシメカロン
C. バーク温度	80	100	120
D. ポストベーク温度	80	100	120
E. ポストベーク時間			
F. 露光時間	30秒	60秒	90秒
G. 現像時間	標準×0.5	標準	標準×1.5
H. 現像温度	19	23	27

表2 L_{18} 直交表

#	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	1	3	3	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

3-6 誤差因子

特性値のところでも述べたが, パターン断面形状にはテーパ角がついており, レジスト上部と下部の形状は大きく異なっている。そのレジスト上部と下部による寸法のばらつきを誤差因子とした。なお前述の通り, 下部寸法としては下寸補正値を用いることとした。

表3 誤差因子の選択

N1	特性値に上寸 y_1 を用いる
N2	特性値に下寸補正値 y_2 を用いる

3-7 SN比と感度の計算法

今回は1つの実験条件に対し上寸 y_1 と下寸補正值 y_2 とがそれぞれ32ヶ, 合計64ヶのデータ点が存在する。表4のようなデータセットに対し, 次のような計算式に従い, SN比と感度を計算した。ここでSN比とは, データ点の $y = M$ の直線への乗り具合を表すもので, SN比が高いほどパターン寸法精度が良いことを表している。感度は直線の傾きに関連する量である。

$$S_T = y_{1,1}^2 + y_{1,2}^2 + \dots + y_{2,32}^2 \quad (\text{自由度} = 64)$$

$$L_1 = y_{1,1}M_1 + y_{1,2}M_2 + \dots + y_{1,32}M_{32}$$

$$L_2 = y_{2,1}M_1 + y_{2,2}M_2 + \dots + y_{2,32}M_{32}$$

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_{32}^2$$

$$S = (L_1 + L_2)^2 / 2r \quad (\text{自由度} = 1)$$

$$S_{N_x} = (L_1 - L_2)^2 / 2r \quad (\text{自由度} = 1)$$

$$S_e = S_T - S - S_{N_x}$$

$$V_N = (S_{N_x} + S_e) / (62 + 1)$$

$$V_e = S_e / 62$$

$$\text{SN比} = 10 \cdot \log_{10}((S - V_e) / 2r / V_N) \quad (\text{db})$$

$$\text{感度} = S = 10 \cdot \log_{10}((S - V_e) / 2r) \quad (\text{db})$$

表4 データセットの一覧

	M_1	M_2	M_p	線形式
上寸	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,32}$	L_1
下寸補正值	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,32}$	L_2

4. 結果と解析

4-1 実験結果とSN比

No.1~No.18, 計18回の実験を行いそれぞれについてSN比と感度を計算した。その結果を表5に示す。またこの中でSN比の大きく異なるNo.1, No.4, No.8についてその転写パターン結果を図5に示す。これらの図からもわかるように, 転写パターンの寸法精度の善し悪しはSN比という尺度で数値的に評価されている。

表5 各実験ごとのSN比と感度 (単位 db)

No.	SN比	感度	No.	SN比	感度
1	-8.992	-0.014	10	-21.931	0.446
2	-14.080	0.232	11	-16.713	0.535
3	-14.262	0.257	12	-20.866	-0.421
4	-15.923	0.605	13	-20.330	0.210
5	-19.818	0.110	14	-11.463	0.319
6	-16.297	-0.486	15	-15.141	0.010
7	-17.317	0.441	16	-17.323	0.636
8	-21.904	-0.257	17	-12.176	0.272
9	-11.638	-0.009	18	-33.639	-1.071

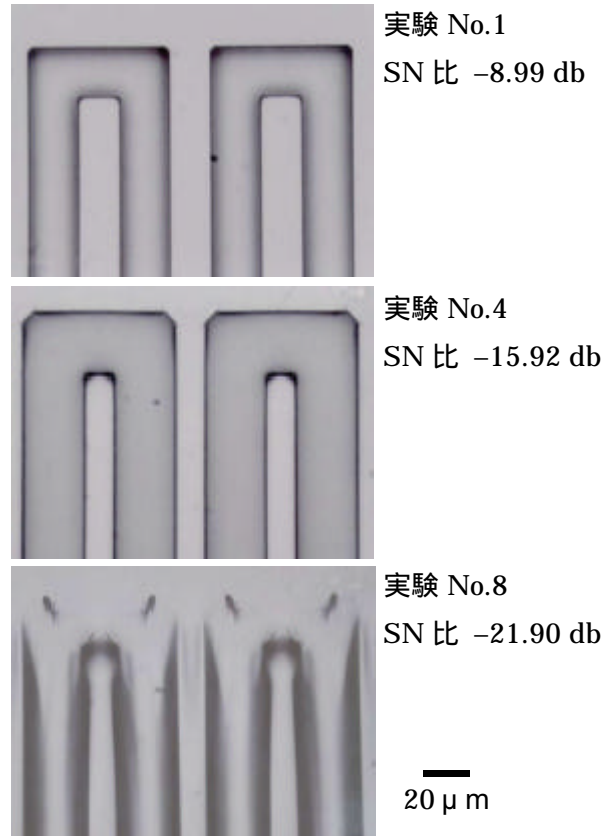


図5 転写パターン結果の一例

4-2 要因効果図と最適条件の推定

各制御因子がSN比(言い換えればパターンの寸法精度)に及ぼす寄与の度合いを評価するため, 制御因子の各水準毎に対する平均SN比と感度を計算しグラフ化したもの(要因効果図という)を図6に示す。SN比の変動に大きく寄与する因子は主にD:ポストバーク温度, G:現像時間, H:現像温度であった。特に現像条件が寸法精度の向上に大きく寄与する事についてはこれまであまり注目していなかった事であり, 今回の解析により初めて明かにできた。また因子Dにおいて交互作用が原因と思われるSN比の大きな山谷が見られるが, 残りの因子については目立った山谷は見られなかった。これについては後で考察をする。

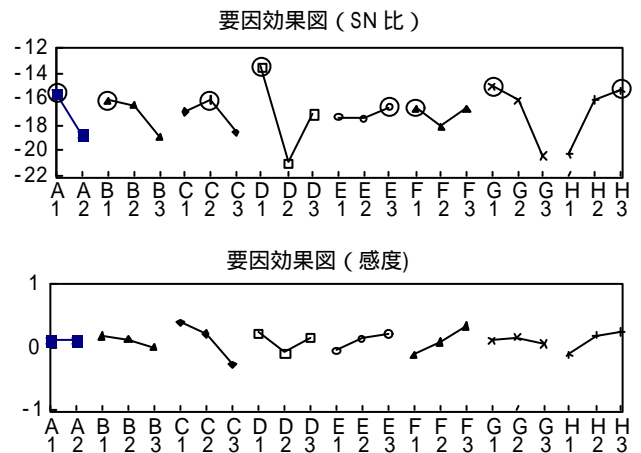


図6 要因効果図

図6の要因効果図より，SN比の最も高い水準を選んで最適条件とした。

最適条件は $A_1, B_1, C_2, D_1, E_3, F_1, G_1, H_3$
従来条件は $A_1, B_2, C_2, D_3, E_2, F_2, G_2, H_2$

5. 考察

図6の要因効果図において，因子D（ポストバーク温度）のSN比に，交互作用が原因と思われる大きな山谷が見られたので，その検証のため追加実験を行った。

追加実験は，制御因子D以外の因子を最適条件の水準とし，因子Dを水準1から3まで変化させる1因子実験を行った。その時の転写パターンとSN比の結果をそれぞれ図7，図8に示す。

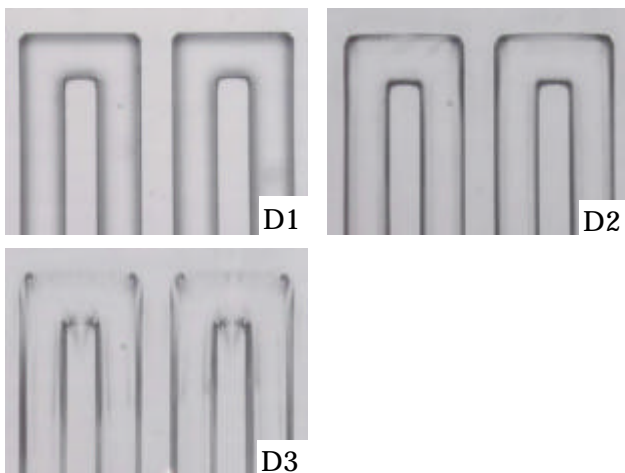


図7 追加実験における転写パターンの結果

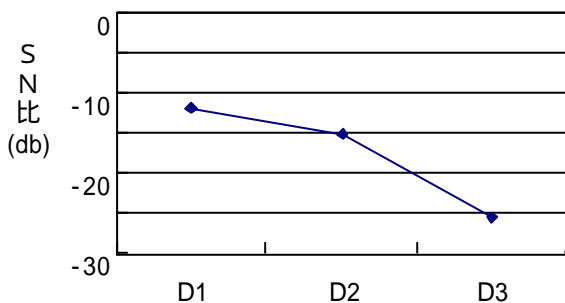


図8 追加実験におけるSN比の変化

D3 D2 D1となるに従って，転写パターンの輪郭やコーナーのシャープさが良くなっている事が見て取れる。またSN比についても図6 要因効果図の中に現れたような山谷は消えて，パターン結果に対応した単調な変化を示していることがわかる。先の L_{18} 直交表に基づく実験では条件が最適化されておらず，他因子との交互作用のため要因効果図に山谷となって現れていたものと考えられる。

6. 確認実験

条件最適化の効果を確認するため，最適条件および

従来条件において確認実験を行った。その結果を図9に示す。最適化によって寸法精度やエッジ部のシャープさが向上している様子が明らかに見て取れる。

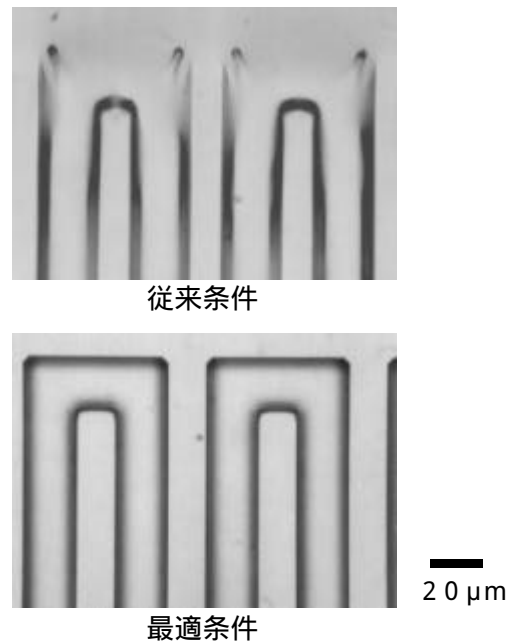


図9 最適化によるパターニング精度向上の様子

7. 結言

品質工学による厚膜レジストの転写条件最適化を行い，次のような結果を得た。

上寸および下寸補正値の両者を解析に用いた転写性の評価によって，厚さ $15\mu\text{m}$ 程度の厚膜レジストに対するパターニング条件の最適化を行い，寸法精度の明らかな向上が達成された。

SN比の変動に大きく寄与する因子は，主にポストバーク温度，現像時間，現像温度であった。このことは，今回の解析で初めて明らかとなったことである。またポストバーク温度については，SN比の要因効果図中に大きな山谷が見られた。

ポストバーク温度以外の因子を最適条件の水準に固定し，ポストバーク温度のみを変化させる1因子実験を行ったところ，SN比の山谷は消えて単調な変化となり，先の要因効果図に見られた山谷が他因子との交互作用によるものであることが明らかとなった。

最後に，多くの助言を頂きました，(財)日本規格協会の矢野 宏博士をはじめ，広島地区ものづくりの機能性評価研究会の方々には感謝申し上げます。

文献

- 1) 矢野 宏 (1994) : 加工品質工学 生産技術の最適化，工業調査会，p.15
- 2) 田口玄一ら (1994) : 品質工学応用講座 半導体製造の技術開発，日本規格協会，p.101