ナノインプリント技術を活用した配線パターンの製作 (1) 熱インプリントとダマシン法を併用したパリレン薄膜への 銅配線形成

尹 成圓*, 高橋 正春*

Study on Copper Interconnection on Low-k Dielectric Parylene-C Film by Hot-Embossing Combined with Damascene Process

Youn Sung WON* and Masaharu TAKAHASHI*

*独立行政法人産業技術総合研究所 (〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1)

*National Institute of Advanced Industrial and Science Technology (1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8564)

1. はじめに

近年, MEMS分野において, 微細な機能デバイスの加工と回路基板を組み合わせた製造技術が検討され, レジストパターンニングやドライエッチングなどの半導体製造技術を応用した, 作成方法が主に取り入れられている。しかし, 使用する装置が高価, 工程数も多く, コスト高であるため, 安価で容易な作成手法が望まれており, 多くの研究者が新しい製造手法を検討している^{1)~3)}。その対応策のひとつとしてナノインプリント技術が注目を集めている。

MEMSデバイスや集積回路などにおいて配線の高密度・微細化の要求に対し, 非シリコン系とは異なる低誘電率材料(樹脂)と銅との組み合わせによる新しい微細パターンニング手法も検討されている⁴⁾。

MEMSデバイスにおける微細パターンの一例としてここでは, 熱インプリント成形加工とダマシン法を併用する銅/低誘電率パリレン-C薄膜の配線に関する研究を紹介する。

2. パターン転写工程

微細パターンのプロセス全般の行程をFig. 1に示す。転写実験に使用した基板素材はパリレン-Cで, 高温耐熱性・低誘電率・厚み調節が容易といった特性を持ちながら, 優れた生態親和性, 化学的安定性などの特性をもつ高純度の熱可塑性結晶性樹脂である。この文章を読まれた方々は, まず, 基板材料に何故パリレン-Cを用いたのか疑問を感じるのではないかと, その点をまず説明しておくべきかと思う。配線基板が一層構造であれば, どのような材料を用いてもかまわない。できれば低温で成形可能なPET (T_g : 63°C~80°C程度) やABS樹脂 (T_g : 70°C~89°C程度) さらにPC (T_g : 153°C) などの樹脂材料も考えられる。しかし, 低温で成形可能ということは, 使用環境温度の制約(高温による安定した形状の維持ができない)を受けることになる。また, 配線材料の銅をスパッタする場合には熱影響の問題

はないが, 導電ペーストを用いる場合には, 150°Cから200°C程度加熱を要するため, 上記のPET, ABS, PC材料は使用できない。そして, 多層構造を考えれば, はじめに成形した層を次の層を成形する際に壊さないように配慮する必要がある。つまり, 1層目は高温で成形する材料, 2層目はそれよりも低い温度で成形する材料と選択が必要となる。パリレン-Cは高温耐熱性という点で成形し難い材料であるが, あえて, 成形し難い材料が可能となれば, ナノインプリントによる配線技術は大きく拓けるであろう。

さて, 微細パターンの転写工程であるが, パリレン-Cは疎水性表面をもち, 他材料との密着性が非常に悪い。したがって, インプリント工程の際パリレン-Cとシリコンウェハとの界面の剥離問題を防ぐために, シリコンウェハ表面にパリレン-Cとの密着性向上処理をする必要がある。パリレン-Cとシリコンウェハの密着性を向上させるためには, シリコンウェハ表面をSF₆プラズマで2分間処理した後, 密着性向上液(IPA: distilled H₂O: KBM-503 100:100:1)をスピン

Fig. 1 Process layout for metallization of copper on parylene-C film micro-patterned by hot-embossing

ンコーティングした。この密着性向上処理によってパリレン-Cとシリコンウェハの剥離現象が改善されることを確認している。シリコンウェハ上に密着性向上処理を施した後、パリレン-Cを堆積させる。微細構造の配線基板パターンをパリレン-Cに熱転写する工程としては、あらかじめ調べた最適熱インプリント条件（加熱温度、加圧力、保持時間の組み合わせ）により、基本とされる配線パターンサイズ（深さ $25\mu\text{m}$ 幅 $10\mu\text{m}$ ）のラインアンドスペースパターンを転写する。パターンを転写したパリレン-Cの薄膜上にメタルバリア層Ta、配線材料の銅めっきを促進するための銅のシード層を薄く形成し、めっきにより銅層を堆積した後、化学的機械的研磨(Chemical Mechanical Polishing: CMP)により余分な銅の除去と平坦化を行った。その結果、アスペクト比2.5（深さ $25\mu\text{m}$ 幅 $10\mu\text{m}$ ）の微細銅パターンを低誘電材料であるパリレン-C薄膜に形成することができる。

さきに述べたが、レジストパターンニングやドライエッチングなどの半導体製造技術と、このナノインプリント技術の比較であるが、Fig. 2に示すような多段構造を考えると、半導体製造工程では、2種類のマスクを用意するなど合計15工程を要するが、ナノインプリント技術では型構造を段つきにすることでおよそ3工程で済む。

2.1 転写用ニッケル型製作

シリコンウェハへの微細パターンニング技術には、形状転写の基となるNi電鍍技術によるインプリント用型の製作が必要である。転写パターンのサイズが小さく、間隔が狭いため、パターン領域の外周部まで全面に良好な転写が得られるように、型構造としてはパターン領域の外周部にダミーパターンを設けた。

Fig. 3にNi電鍍による配線パターンを示す。凸部形状が配線パターンの導電性材料であるCuを埋め込む溝形成と

Fig. 2 Photolithography process and imprint lithography process number comparison

Fig. 3 Photos and SEM images of Ni mold with positive pattern

なる。凸部形状が配線パターンとなる。

2.2 パリレンCへの熱インプリント成形

一般的に樹脂材料の熱インプリント温度は、ガラス遷移点より数十度高くするのが一般的である。その理由としては、その温度付近で、樹脂材料の流動性が向上するからである。その逆に加熱温度不足は、型の微細なパターンに過大な応力が加わり破損を招く。流動性の向上する温度以上では、樹脂は弾性変形（回復）なしのほぼ液体のような変形をする。最適な熱インプリント温度を調べるには、実験にて温度を変えて成形状態を調べる方法もあるが、成形温度が低く型のパターンを破損する可能性もある。そのため、あらかじめ樹脂の高温での変形挙動（粘弾性特性）を定量的に調べる必要がある。調べる方法としては動的熱機械的性質測定（レオメータ）がある。動的熱機械的性質測定法によって調べたパリレンの高温粘弾性特性では約230°C ($T_g+140^\circ\text{C}$)でパリレン-Cの特性が急激に減少した。この結果はパリレン-Cの成型温度を230°C以上にすることが望ましいということを示す。高温粘弾性測定データを基にして、

Fig. 4 Typical imprinting conditions history

Fig. 5 Photograph and SEM image of patterns on parylene surfaces imprinted under incomplete filling conditions; $T_L=T_U=190^\circ\text{C}$, $P=200\text{ kgf}$, $t_H=1800\text{ s}$

パターン領域の最適成型条件（温度、圧力、保持時間）を調べた。パリレン-Cは大気中では120°C以上の温度で酸化による表面品質の低下が起きるので、インプリント実験は真空中で行った。成型実験の結果、密着性向上処理にかかわらず、インプリントプロセスの後、パリレン-C薄膜とシリコンウェハの剥離、パリレン-C薄膜のクラックなどが観察された。その原因としては、シリコンとパリレン-C間の熱膨張の差による熱応力、冷却中に起きる樹脂の収縮などが考えられる。剥離を防ぐには、冷却中ガラス転移点以下の温度まで、ある程度の加圧力を維持する必要がある。最適エンボスプロセス行程（温度と圧力の関係）をFig. 4に示す。また、成型したサンプルをFig. 5に示す。

2.3 Seed・Barrier層のSputteringとCuめっき

Dry-crosscut試験による密着性評価結果は、パリレン-C薄膜に対して、TiよりTa拡散防止膜のほうが密着性が弱

Fig. 6 SEM images of embossed surfaces before and after O_2 plasma treatment

(a) Parylene surfaces imprinted

(b) Cu electroplated

(c) After CMP

Fig. 7 Optical and SEM images of micro-scale gap-filled Cu lines in parylene-C surface after

かった。しかし、Taの電気抵抗値は $1.25 \times 10^{-5} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$ でTiの電気抵抗値の $5.54 \times 10^{-5} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$ より低いと言う点で、デバイス特性を考慮するとTa層をシード層として利用した。パリレン-Cを O_2 プラズマ表面処理することによってTa拡散防止層との密着性を向上させることができる。 O_2 プラズマ処理前後のパリレン-Cの表面性状をFig. 6に示す。

2.4 Cuめっきと化学機械研磨(CMP)

続いて、プラズマ処理したパリレン-C薄膜上にメタルバリア層Ta、銅のシード層を薄く形成し、めっきにより銅を堆積した後、CMPにより平坦化を行った。その結果、アスペクト比2.5の微細パターンをパリレンC薄膜に形成することに成功した(Fig. 7)。

3. まとめ

本研究はホットエンボス加工とダマシン法による銅/低誘電率パリレン-C薄膜の配線技術について紹介した。まず、パリレン-Cと異種材料(Siウェハ、バリア層)の密着性向上方法を検討した。パリレン-C薄膜に深さ $25 \mu\text{m}$ 幅 $10 \mu\text{m}$ のラインアンドスペースパターン部を転写させるホットエンボスプロセス条件の最適化。エンボス成形したパリレン-

C薄膜上にメタルバリア層Ta、銅シード層を薄く形成し、めっきCuを堆積した後、CMPによる平坦化処理を行った。その結果、アスペクト比2.5の微細銅パターンをパリレン-C薄膜に形成することができた。集積回路の微細化に伴い銅/低誘電率薄膜配線技術の重要性はどんどん高まっている。この技術がどこかで実用化されることをのぞむ。

(2009.3.30-受理)

文 献

- 1) H. Wensink, et al.: "High Resolution Powder Blast Micromachining, 2000", MEMS 2000, Miyazaki, pp. 769-774
- 2) A. Nakai, et al.: Astereoscopic Display with a Vibrating Microlens Array, MEMS2002, Las Vegas, (2002), pp. 524-527
- 3) Y. Hirai, et al.: "Study of the Resist Deformation in Nanoimprint Lithography," J. Vac. Sci. Technol. Vol. **B19**, 2811, 2001
- 4) U.-H. Lee, H.-J. Lee, H.-J. Sohn and T. Kang: "A Study of Copper Electroplating of the Submicrometer Scale Patterns", Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. **9**, No. 4, pp. C65-C68, 2006

SWET-2000	SWET-2100e	SP-1	SP-2	SAT-5100	SAT-5200
広 告					
鉛フリーはんだの濡れ性評価用 試験治具板					
①試験機メーカー共通ルツボ		レジスト内径	10φ×20φ		23.5×23.5 ¥38
②小球14幅マイクロルツボ	1φ	2φ	4φ	8φ	10φ
③20幅 マイクロルツボ	レジスト	内径	10φ		2.2×2.8
④加熱板 はんだ槽の溶融熱で、はんだ槽上の加熱板を加熱してベレット、ペーストを溶融させる					
⑤マイクロルツボの装着治具	23.5×23.5		ルツボの変更		SAT-5100
⑥【発明の名称】 鉛フリーはんだペーストが濡れ進む速度および距離		L型	銅板又は銅棒	当社開発 メッキ付き	
⑦プロファイル	平銅板 15×15	レジスト内径6.5φと無地 20×20			
⑧銅棒 0.6φ×30		0.5φ×2.5	1.0φ	25.4×31	23.5×23.5
⑨プルテスト加熱コーティングプローブ プローブに支給はんだボールの接合		0.6φ×15		線径と長さは、いろいろあります 当社開発 PTR-1000	
⑩小物の切断加工	銅板のチップサイズ	低温での濡れ性	放熱板	棒はんだ Sn-58Biの接合	
⑪SEM 試験品断面観察用パネ	ハートパネ	三角パネ、ワンタッチ装着基板を立てるパネ		X線透過試験片	
⑫温度計センサークリップ ビーカー用	200ml	デジタル、棒状、二枚パネでしっかり固定			
⑬はんだボールの濡れ性にシリコンゴム挿入のアルミロット棒					
⑭極小実装部品のチャッキングセット				⑮フラットIC修正用コテ先	
酸洗い このまま測定できる試験片 超音波洗浄					
DCU 0.3t	ニッケル0.3t	0.3t×5×15	X線透過試験片		メッキ
①3×10	5×30	C1100	0.3t×10×10		金
②3×20	10×30	C1020	0.3t×12×12		銀
③5×15	30×30	C1220	2×2 7×7		すず
④5×30	2.3φ	C2800	低温測定		ニッケル
⑤10×30		C2801	0.3×1×10		Sn-Bi
⑥10×10			0.3×2×10		Sn-Ag
⑦12×12	金型 プレス加工		金・すずメッキの切断		Sn-Cu
⑧15×15	洋白 亜鉛板 ニッケル板		銅、板と線 その他		
⑨20×20					
⑩25×25					
⑪30×30					
⑫25.4×31					
TEL/FAX 0425-37-4192 送料 ¥600 真空パック ¥100 実用新案 第3034062号 のり付ネームプレートの両ダレ面の切断 丸山製作所 営業所 〒190-0031 東京都立川市砂川町8-24-7 工場 東京都杉並区西荻北 携帯0901-5531-353 丸山孝一					