

半導体の三次元実装に向けたファインピッチ再配線材料の開発

(太陽ホールディングス株式会社) 石川信広

【要旨】

本研究では、3次元実装の実現に向けて、優れた解像性と高い絶縁信頼性を有する新規のネガ型感光性絶縁材料(Photosensitive Dielectric Material, PSDM)を開発した。PSDMはステッパーを用いて、 $0.7\ \mu\text{m L/S}$ 、アスペクト比3.7のパターン形成が可能であった。また、セミアディティブプロセス(Semi Additive Process, SAP)にて $1.0\ \mu\text{m L/S}$ パターンのテストチップ(Test Elemental Group, TEG)を作製し、バイアス加速ストレス試験(Biased Highly Accelerated Stress Test, BHAST)にて絶縁信頼性を行った。200時間のBHASTを行った後も、抵抗値は $1.0 \times 10^6\ \Omega$ 以上を維持しており、優れた絶縁信頼性を有していることが示された。

【緒言】

近年、半導体産業では、ムーアの法則が限界に近付きつつあり、三次元実装技術とチップレット技術が注目を集めている^{1)~4)}。三次元実装は、複数のチップを積層し、高密度な集積を実現する技術であり、面積効率やデバイス性能の向上に寄与する。一方で、チップレット技術は、異なる機能やプロセスノードを持つ複数の小型チップ(チップレット)を高密度で実装し、デバイスの高性能化やコスト削減を実現すると期待されている。この二つの技術の融合により、高性能かつ効率的なシステム設計が可能となる。その中でも再配線層(Redistribution Layer, RDL)は極めて重要な役割を果たすと考えられており、将来的にはサブミクロンのライン/スペース(L/S)パターンが求められると考えられている。

再配線層の形成にはセミアディティブプロセス(Semi Additive Process, SAP)が広く用いられている。SAPでの配線の微細化にはシード層のエッチングやレジストの剥離に伴う課題がある⁵⁾。近年、シード層のエッチングが不要で、SAPに比べて工程を削減できるダマシンプロセスによる再配線層の形成の検討が始まっている⁶⁾。

ダマシンプロセスを指向したRDLに求められる特性として、1) サブミクロンの解像性、2) 広い焦点深度(Depth of Focus, DOF)、3) 高絶縁信頼性、を併せ持つ必要があると考えられる。フォトリソグラフィーの解像度およびDOFは使用する光源の波長と開口数に依存し、下記のレイリーの式に従うことが知られている。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (1)$$

$$\text{DOF} = k_2 \frac{\lambda}{\text{NA}^2} \quad (2)$$

ここで、 R は解像度、 λ は露光波長、 NA は結像レンズ系の開口数、 k_1 および k_2 は感光材料に依存するプロセス係数である。レイリーの式 (1) より、解像度は λ に比例し、 NA に反比例する。一方で、レイリーの式 (2) より、DOF は λ に比例し、 NA^2 に反比例する。これらの式からわかるように、解像度と DOF にはトレードオフの関係があり、所望の解像度で広い DOF を達成するためには、最適な露光波長 λ と低い NA が必要となる。

Table 1. MATERIAL PROPERTIES

Photosensitivity	Negative tone
Conductivity	Dielectric material
Developer	2.38% TMAH
Exposure	i-line ($\lambda = 365 \text{ nm}$)

我々はこれまでに、ネガ型感光性絶縁材料 (Photosensitive Dielectric Material, PSDM) の膨潤度がパターンプロファイルに及ぼす影響を調査した⁷⁾。本研究では、現像液による膨潤を制御した PSDM のリソグラフィー特性の評価、ならびに $1.0 \mu\text{m}$ L/S の微細配線における絶縁信頼性の評価を行った。

【実験】

感光性絶縁材料(Photosensitive Dielectric Material, PSDM)

我々は、優れた解像性と高い絶縁信頼性を併せ持つ新規ネガ型感光性絶縁材料 (Photosensitive Dielectric Material, PSDM) を開発した。Table 1 に PSDM の特性を示す。PSDM のベースポリマーはフェノール性水酸基を有し、2.38%テトラメチルアンモニウムヒドロキシド (TMAH) 水溶液に対して優れた溶解性を有している。この PSDM からなる組成物に光を照射すると、露光部にて架橋反応が進行するため、2.38%TMAH に対して不溶化し、現像が可能となる。

リソグラフィー特性

リソグラフィー特性は次の手順に従い評価した。PSDM を 8 インチシリコンウエハにスピコートし、 90°C のホットプレートで 180 秒ソフトベークを行い、膜厚 $2.0\text{--}4.0 \mu\text{m}$ のサンプルを作製した。その後、フォトマスクを介して i 線ステッパーにて所定量露光し、 120°C のホットプレートで 60 秒の露光後加熱 (Post Exposure Bake, PEB) を行い、2.38%TMAH 水溶液にて現像することでパターンの形成を行った。

Test Elemental Group (TEG)の作成

RDL 用の感光性材料には高い絶縁信頼性が求められる。1.0 μm L/S パターンを持つ TEG は、SAP により作成した。TEG の作製フローを Fig. 1 に示す。

PSDM を 8 インチのウエハにスピコートし、90°C で 180 秒のソフトベーク (SB) 後、窒素雰囲気下 220°C で硬化させた (第 1 層)。その後、第 1 層上にチタン/銅のシード層をスパッタにより形成した。電解銅めっき用のフォトレジストを第 1 層上にスピコートし、ソフトベーク、露光、PEB を行い、現像してパターンを形成した。その後、電解銅めっきにより銅配線を形成した。銅めっき後、フォトレジストを除去し、エッチングによりシード層を除去した。次に、PSDM をスピコートし、ビアを形成するためにパターンニングを行い、窒素雰囲気下 200°C で硬化した (第 2 層)。これらの操作を繰り返し、3 層構造を持つ TEG を作製した。

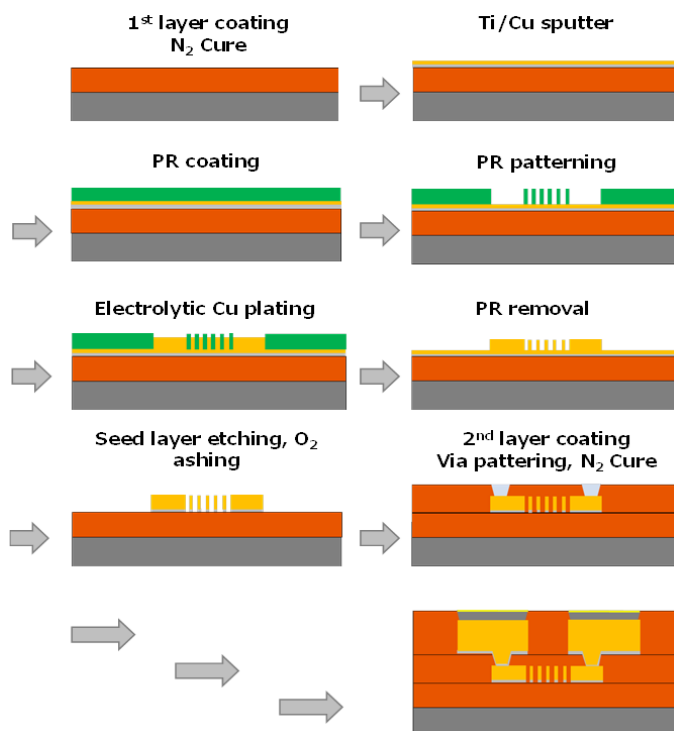


Fig. 1. Flowchart for the fabrication of the TEG.

絶縁信頼性

絶縁信頼性は、Fig. 2 に示す 1.0 μm L/S パターンの TEG を用いて、バイアス加速ストレス試験 (Bias Highly Accelerated Stress Test, BHAST) により評価した。BHAST は、HASTEST® MODEL PC-R8D (平山製作所) および MIGRATION TESTER MODEL MIG-8600B (IMV) を用いて実施した。試験条件は、温度 130°C、湿度 85%、

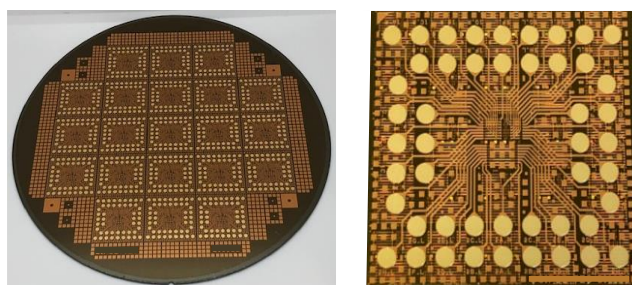


Fig. 2. Overview of the TEG.

および印加電圧 1.7 V で行った。

【結果と考察】

リソグラフィー特性

Fig. 3 に PSDM の断面 SEM 画像を示す。1.0～0.7 μm L/S パターンが矩形性高く形成できていることが確認できる。これは、開発した PSDM の現像溶媒に対する膨潤を制御しているためと考えられる⁷⁾。さらに、0.7 μm L/S パターンではアスペクト比が 3.7 であった。フォトレジストはアスペクト比が高くなるにつれて、パターンの崩壊が起こりやすくなる。そのため、一般的なフォトレジストではアスペクト比が 3.0 以下であることが多い⁸⁾。開発した PSDM はサブミクロンの解像性と高アスペクト比を両立できており、優れたリソグラフィー特性を有していると考えられる。

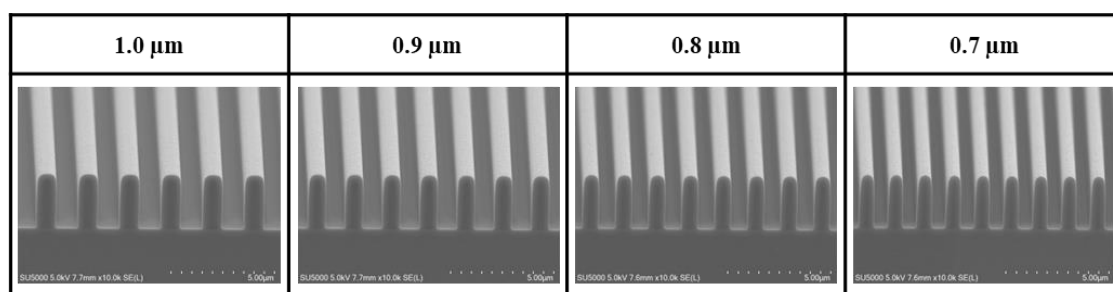


Fig. 3. Cross-sectional FE-SEM images of the PSDM patterned on a Si wafer. 1, 0.9, 0.8, and 0.7 μm L/S patterns. Film thickness: 2.6 μm , exposure dose: 122 mJ/cm².

PSDM のマスクリニアリティを Fig. 4 に示す。グラフの横軸と縦軸は、それぞれマスクのライン幅と CD を表している。理想的な感光性材料は、直線の傾きが 1 となり、マスク直線性を示す。Fig. 4 から、PSDM は十分なマスクリニアリティを有していることが分かる。

絶縁信頼性

Fig. 5 に、PSDM の BHAST 結果を示す。実験項で述べた条件下にて、BHAST を 200 時間行った後においても、抵抗値は $1.0 \times 10^6 \Omega$ 以上を維持した。このことから、PSDM は、1.0 μm L/S パターンにおいても絶縁信頼性を有することが示された。

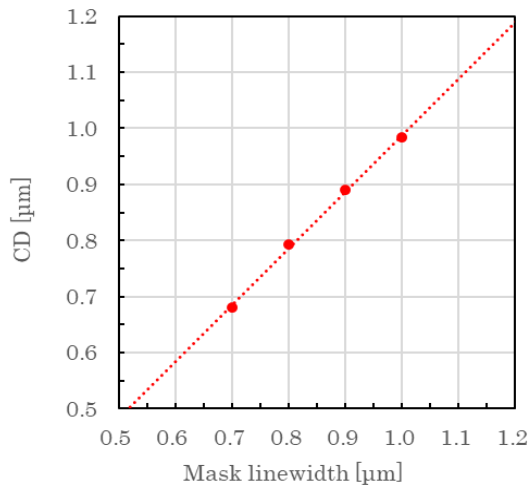


Fig. 4. Mask linearity plots of the PSDM. Film thickness: 2.6 μm , exposure dose: 122 mJ/cm^2 .

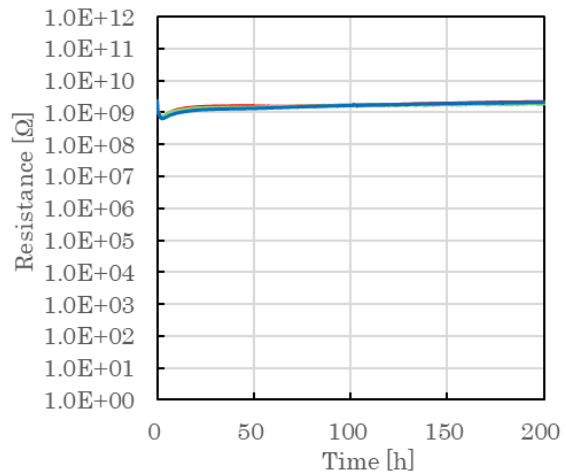


Fig. 5. BHAST results at 130 °C, a relative humidity of 85%, and an applied voltage of 1.7 V using 1 μm L/S patterns.

【結論】

本研究では、PSDM のリソグラフィ特性および絶縁信頼性の評価を行った。露光条件を最適化することで、0.7 μm L/S のパターン形成が可能であり、得られたパターンは矩形性が高く、アスペクト比は 3.7 であった。また、SAP により 1.0 μm L/S パターンを持つ TEG を作製し、BHAST を用いて絶縁信頼性を評価した。試験の結果、開発した PSDM が高い絶縁信頼性を有していることが示された。

【参考文献】

- [1] Homepage of the International Roadmap for Devices and Systems, 2020 Edition, <https://irds.ieee.org/editions/2020/packaging-integration>.
- [2] Homepage of IEEE ELECTRONICS PACKAGING SOCIETY, Heterogeneous Integration Roadmap, 2021 Edition, https://eps.ieee.org/images/files/HIR_2021/ch02_hpc.pdf.
- [3] Y. P. Chiang, S. P. Tai, W. C. Wu, J. Yeh, C. T. Wang, D. C. H. Yu, *Proc. Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC)*, virtual, Jun 1-Jul 4, 2021, 130–135.
- [4] P. Lin, M. C. Yew, S. S. Yeh, S. M. Chen, C. H. Lin, C. S. Chen, C. C. Hsieh, Y. J. Lu, P. Y. Chuang, H. K. Cheng, S. Jeng, *Proc. Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC)*, virtual, Jun 1-Jul 4, 2021, 723–728.

- [5] C. H. Yu, L. J. Yen, C. Y. Hsieh, J. S. Hsieh, Victor C. Y. Chang, C. H. Hsieh, C. S. Liu, C. T. Wang, K. C. Yee, D. C. H. Yu, *Proc. Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC)*, San Diego, USA, May 29-1 Jun, 2018, 587–593.
- [6] W. W. Flack, R. Hsieh, H. Nguyen, J. Slabbekoorn, S. Suhard, A. Miller, A. Hiro, R. Ridremont, *Proc. Electronics Packaging Technology Conf. (EPTC)*, Singapore, Dec 4-7, 2018, 395–400.
- [7] D. Yukimori, G. Inoue, N. Ishikawa, A. Sekiguchi, T. Ogata, *Proc. Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC)*, San Diego, May 31-June 3, 2022, 1996–2001.
- [8] B. W. Smith, K. Suzuki, “Microlithography”, *CRC PRESS*, 2020, “Chapter 8”, 468–469.