

UV ナノインプリントリソグラフィを用いた 大面積集積フォトニクスプロセスの開発

雨宮 智宏 永松 周 西山 伸彦
森 莉紗子 藤井 恭 浅井 隆宏 塩田 大

東京工業大学 工学院電気電子系

東京応化工業(株) 新事業開発一部

1. はじめに

ナノインプリントリソグラフィ (NIL) は、ナノスケールのスタンプを用いた押印技術であり、従来の露光法と違って露光波長に解像度が依存しないこと、大面積転写性や高スループット性を有していることから、半導体における次世代リソグラフィ技術の一つとして期待されている¹⁻⁴⁾。特に、ソフト UV-NIL⁵⁾ は、半導体製造環境との互換性を担保しつつ、半永久的な機能層を大面積かつ高解像度でパターンニングできることから、近年、拡張現実 (AR グラス) や生物医学診断 (DNA シーケンサー) などの新たなアプリケーションに対する実用的な量産技術として導入実績がある^{6,7)}。これに加えて、基

礎研究レベルでも、メタマテリアルやメタサーフェスなどのウェハ光学素子を実現する際に活用されている⁸⁾。

そのような中、半導体の製造技術を用いてウェハ上に大規模な光回路を構築する集積フォトニクス分野においても、NIL が活躍できる可能性がある。本分野において最も解像度が必要とされる場面は、DFB (分布帰還型) レーザにおける回折格子の形成、光回路の入出力に使用するグレーティングカップラの形成、シリコンフォトニクス光回路における導波路の形成などであり、いずれも 100 nm 程度の解像度が保証されていれば十分といえる。そのため、他の露光技術に比べて、NIL の大面積転写性や高スループット性が大いに活かせ、かつコスト観点からも優位性があると考えられる (図 1 参照)。この

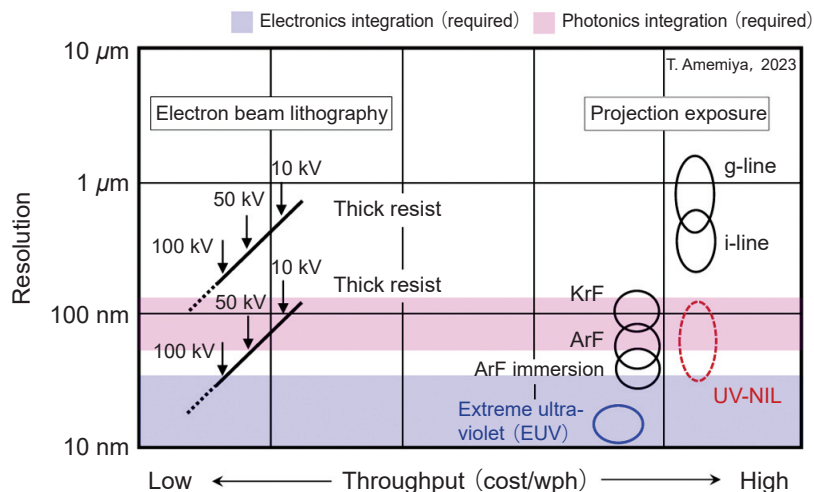


図 1 シリコンフォトニクスプロセスに適した光硬化性樹脂

ような背景のもと、当グループでは、集積フォトニクスにおける一分野として、近年発展が著しいシリコンフォトニクスプロセスに UV-NIL を導入することを目指している。本研究では、シリコンフォトニクスプロセスに合わせた NIL レジストの開発を行うとともに、SmartNIL 技術に基づいたロールオンプロセスの最適化を行うことで、従来の ArF 液浸露光や電子線描画を用いたシリコンフォトニクスプロセスと遜色ない伝搬損失を持つ導波路を形成することに成功した。以下、詳細を述べる。

2. シリコンフォトニクスプロセスに適する光硬化性樹脂

Tower Semiconductor, GF (GlobalFoundries), AMF (Advanced Micro Fundry) などのシリコンフォトニクスを扱っている各種ファウンドリでは、大面積転写性や高スループット性を鑑みて、ArF 液浸リソグラフィが使用される傾向にある。これを UV-NIL で代替する場合、マスクとして利用する光硬化性樹脂には、標準的に UV-NIL で要求される性能⁹⁾に加えて、最低限、以下の2つの要求を満たすことが必須となる。

2.1 SF₆-C₄F₈ 混合ガスによるエッチング耐性

シリコンフォトニクスプロセスではシリコン導波路構造を形成するために、SF₆-C₄F₈ 混合ガスによる擬似的なボッシュプロセスを用いて、膜厚 200 - 300 nm のシリコン層を全て削りきる必要がある。そのため、SF₆ プラズマに対する高いエッチング耐性が要求される。

2.2 O₂ アッシングによる除去

一般的な UV-NIL で用いられる光硬化性樹脂は、主にフッ酸溶液 (BHF) 処理により除去できるようデザインされている。しかしながら、シリコンフォトニクスでは、下部クラッド材として SiO₂ を用いていることから、エッチング後の除去プロセスとしてフッ酸溶液処理は適当ではない (エッチングによる導波路構造形成後、下部 SiO₂ クラッド層が露出しているため)。そのため、有機溶剤処理、もしくは O₂ プラズマアッシングで除去でき

ることが必須となる。また、併せて、SF₆-C₄F₈ 混合ガスによる変質性が極力抑えることが求められる。

本研究では、東京工業大学および東京応化工業の2者間で協働研究拠点を設立し、シリコンフォトニクスプロセスに適した光硬化性樹脂として、図2に示すような材料を開発・使用した。各成分の比率は、SF₆-C₄F₈ 混合ガスによるドライエッチング条件に対して最適化することで、エッチング耐性の向上を図っている。

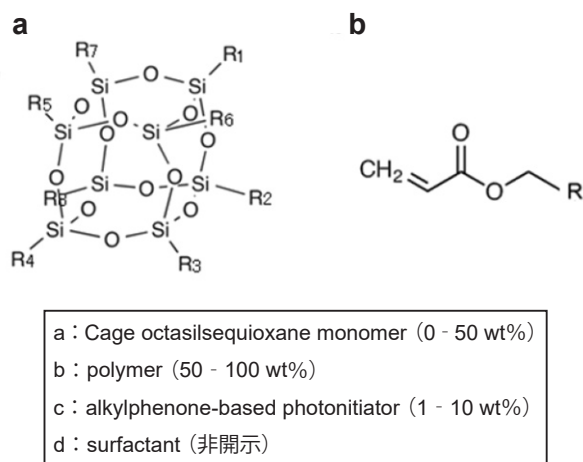


図2 シリコンフォトニクスプロセスに適した光硬化性樹脂

3. UV-NIL を用いたシリコンフォトニクスプロセス

本研究におけるインプリント工程は、EVG620 NT UV-NIL 装置を用いた SmartNIL 技術に基づいている。これは、透明なフレキシブルポリマーのワーキングスタンプを使用して、ウェハレベルで UV-NIL を行う技術である。図3に開発した光硬化性樹脂を用いた UV-NIL によるシリコンフォトニクスプロセスを示す。まず、光回路パターンが形成されたシリコンマスタースタンプ (EBL および SF₆-C₄F₈ 反応性イオンエッチングにより作製) に離型剤およびワーキングスタンプ剤 (EVG NIL UV/AS5) をスピコートした (膜厚 2 μm)。その後、それを上部に配置されているポリエチレンテレフタラートのフレキシブルバックプレーン (図では Foil 表記) に押し当てて 365 nm の LED 光源により紫外線硬化させた後 (300 mW/cm², 200 秒)、離型させた。押印時はロールオ

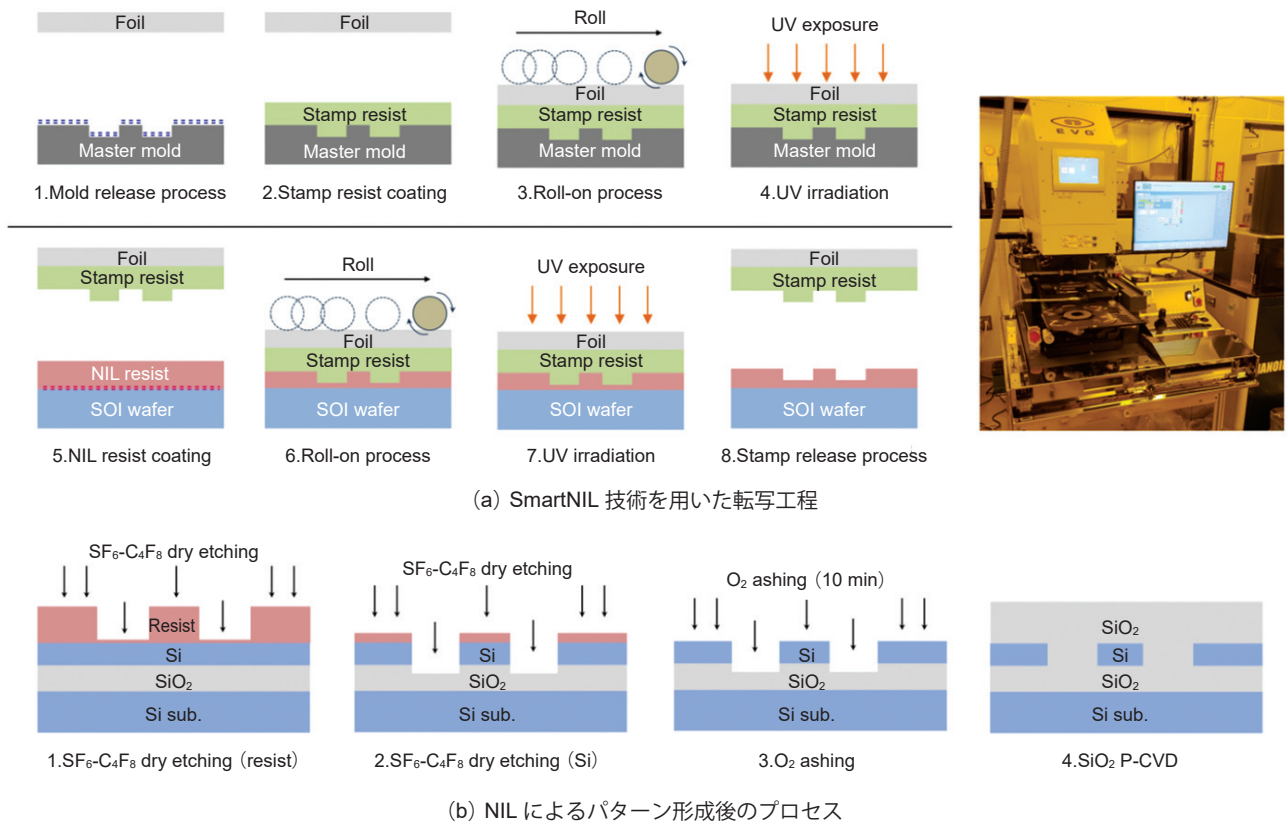


図3 開発した光硬化性樹脂を用いた UV-NIL によるシリコンフォトニクスプロセス

ンプロセスにより、適切な圧力がかかるよう装置側で調整を行った。

次に、SOI ウェハに密着材および開発した光硬化性樹脂をスピコートした後、先ほど作製したワーキングスタンプを押し当てた。ワーキングスタンプとウェハ表面が接触している間、スタンプ構造は毛細管力によって充填され、これにより光硬化性樹脂にパターンが転写される。この状態で、365nm の LED 光源により UV 照射を行った後、ワーキングスタンプを脱離させることで、NIL による導波路パターンの形成を完了させた。

NIL によるパターン形成後は、光硬化性樹脂の除去に O_2 プラズマアッシングを用いる点を除いて、標準的なシリコンフォトニクスプロセスと同一とした。このとき、光硬化性樹脂の残膜制御は極めて重要であり、その後のエッチングによって形成される導波路の垂直

性に多大な影響を及ぼす。図 4 (a) に NIL による導波路パターン形成後の断面 SEM 画像を示す。光硬化性樹脂の膜厚 (400 nm) およびマスタースタンプのアスペクト比・配置などに影響される充填率を考慮することで、膜厚 20 nm 以下の残膜制御がされていることが見て取れた。また、図 4 (b) (c) に NIL で形成されたパターンに対してドライエッチングおよびアッシングを行った際の各工程における断面 SEM 画像を示す。幅 500 nm の導波路パターン及び両脇のトレンチ構造は適切に形成できており、併せて、十分な垂直性を維持したまま膜厚 220 nm のシリコンを削りきれていることが確認された。

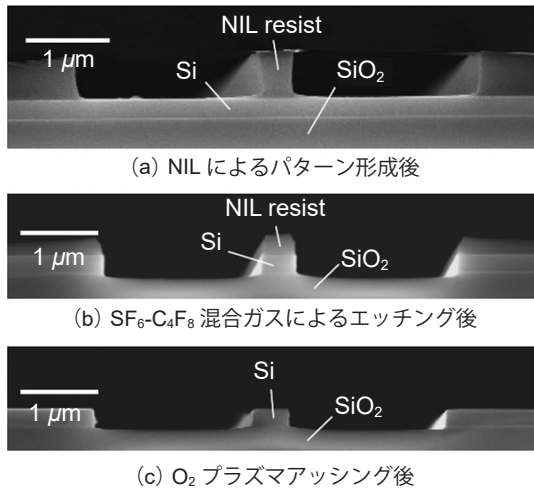
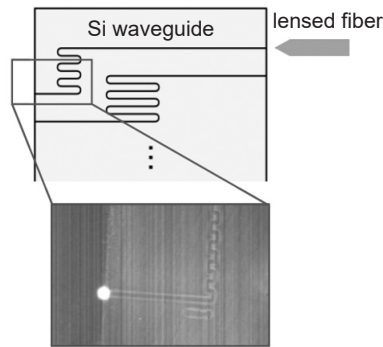


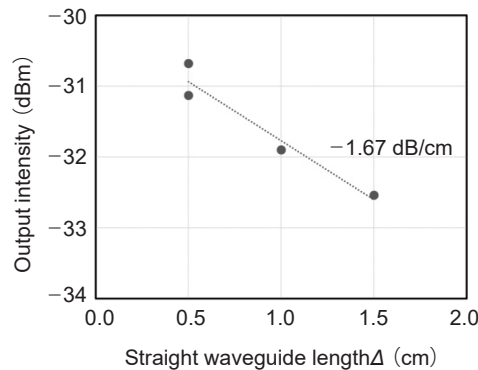
図4 各工程後の断面 SEM 画像

4. 伝搬損失の測定

開発した光硬化性樹脂を用いることで UV-NIL によって形成されたシリコン導波路の伝搬特性を測定した。本研究では、直線導波路部分の長さが 0.5 mm ずつ異なる 3 本の導波路パターンに対して、出力光強度を測定することで導波路損失を見積もった。波長 1550 nm の TE モード光に対する出力強度の導波路長依存性を図 5 に示



(a)



(b)

(a) デバイス概要と赤外カメラ画像（出力端ではシングルモードのスポットが観測された）
 (b) 伝搬特性

図5 開発した光硬化性樹脂を用いて UV-NIL によって形成されたシリコン導波路の伝搬特性

す。このとき、プロットの傾きが、先球ファイバを介した結合損失および測定系損失を差し引いた単位長さ当たりの導波路損失を表しており、1.67 dB/cm となった。これは、従来の ArF 液浸露光や電子線描画を用いて作製されたシリコン導波路と遜色ない値であり、NIL によって十分な性能を持つ光回路が形成可能であることを示唆している。

文献

- 1) J. Haisma, M. Verheijen, K. van den Heuvel, J. van den Berg, "Mold-assisted nanolithography: a process for reliable pattern replication," *J. Vac. Sci. Technol.* **B** 14, 4124 (1996)
- 2) M. Colburn, S. C. Johnson, M. D. Stewart, S. Damle, T. C. Bailey, B. Choi, M. Wedlake, T. B. Michaelson, S. V. Sreenivasan, J. G. Ekerdt, C. G. Willson, "Step and flash imprint lithography: a new approach to high-resolution patterning," *Proc. SPIE* **3676**, 379 (1999)
- 3) H. Schiff, "Nanoimprint lithography: An old story in modern times? A review," *J. Vac. Sci. Technol.* **B** 26, 458 (2008)
- 4) M. Eibelhuber, T. Uhrmann, T. Glinsner, P. Lindner, "Nanoimprint Lithography enables cost effective photonics production," *Photonics Spectra* **49**, 34 (2015)

- 5) T. Glinsner, U. Plachetka, T. Matthias, M. Wimplinger, P. Lindner, “Soft UV-Based Nanoim-Print Lithography for Large-Area Imprinting Applications,” *Proc. SPIE* **6517**, 651718 (2007)
- 6) C. Thanner, A. Dudus, D. Treiblmayr, G. Berger, M. Chouiki, S. Martens, M. Jurisch, J. Hartbaum, M. Eibelhuber, “Nanoimprint lithography for augmented reality waveguide manufacturing,” *Proc. SPIE* **11310**, 1131010 (2020)
- 7) B. Dielacher, M. Eibelhuber, T. Uhrmann, “High-volume processes for next-generation biotechnology devices,” *Solid State Technol.* **59**, 11 (2016)
- 8) M. Kast, “High Precision Wafer level optics Fabrication and Integration,” *Photonics Spectra* **44**, 34 (2010)
- 9) E. A. Costner, M. W. Lin, W. L. Jen, C. G. Willson, “Nanoimprint lithography materials development for semiconductor device fabrication,” *Ann. Rev. Mater. Res.* **39**,155 (2009)