

第 2 章

////////////////////////////////////
ナノインプリント・リソグラフィ技術に
おける構造形成プロセス・シミュレーション
および装置の開発と実用化
////////////////////////////////////

第1節 UVナノインプリントリソグラフィを導入したシリコンフォトリソグラフィプロセス

東京科学大学 雨宮 智宏・永松 周・西山 伸彦
東京応化工業株式会社 森 莉紗子・藤井 恭・浅井 隆宏・塩田 大
産業技術総合研究所 渥美 裕樹

はじめに

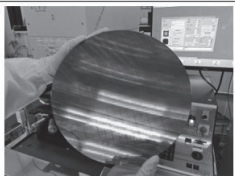
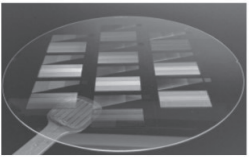
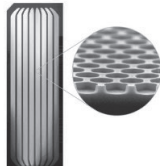
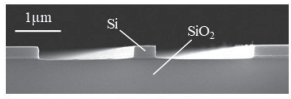
ナノインプリントリソグラフィ（NIL）は、半導体における次世代リソグラフィ技術の一つとして期待されており、特にUV-NILは実用的な量産技術として導入実績がある。そのような中、シリコンフォトリソグラフィに代表される集積フォトリソグラフィ分野では、最先端電子デバイスレベルの解像度を必要としないことから、UV-NILの大面积転写性や高スループット性を大いに活かすことができ、コストの観点からも優位性があると考えられる。当グループでは、シリコンフォトリソグラフィプロセスに合わせたNIL用の光硬化性樹脂の開発を行うとともに、SmartNIL技術に基づいたロールオンプロセスの最適化を実施することで、従来のCMOSプロセスラインや電子線描画を用いて作られた光導波路と同程度の性能を得ることに成功している。本章では、その詳細について述べる。

1. NILと各種露光技術の比較

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や、大面积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¹⁻³⁾。特にソフトUV-NIL⁴⁾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积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）^{5,6)}、メタマテリアルやメタサーフェスなどのウェアハ光学素子⁷⁾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（図1参照）。そのような中で、半導体の製造技術を用いてウェアハ上に大規模な光回路を構築する集積フォトリソグラフィ分野でも、NILを導入できる可能性がある。

図2は代表的な露光技術である「投影露光方式（Projection Exposure）」「電子線露光方式（Electron beam）」「ナノインプリント方式（Nanoimprinting）」の性能指数をまとめたものである。ここで、横軸はwph/costで表されるスループット性能、縦軸は露光解像度を表しており、右下ほど性能が高い技術となる。

まず、投影露光方式の代表格であるArFリソグラフィは、波長193 nmのArFエキシマレーザを光源とし、レンズ開口数（NA）1.35の液浸露光系を用いることで、ラインアンドスペース（L/S）のハーフピッチで40 nm程度のパターン形成能力を有する。これらは、SADP（Self-Aligned Double Patterning）やSAQP（Self-Aligned Quadruple Patterning）と呼ばれる成膜技術やエッチング技術を活用することで、さらなる微細化（SADP：hp約20 nm、SAQP：hp約10 nm）が可能であり、電子デバイス・光デバイスの製造に広く用いられている。

	Displays & Augmented Reality	Life Science	Silicon Photonics & PICs
Application level			
Chip level			

<https://www.photomask.co.jp/>

<https://jp.illumina.com/>

<https://amemiya-lab.net>

図1 NILの応用先技術（左：ARグラス、中央：DNAシーケンサー、右：集積フォトニクス）

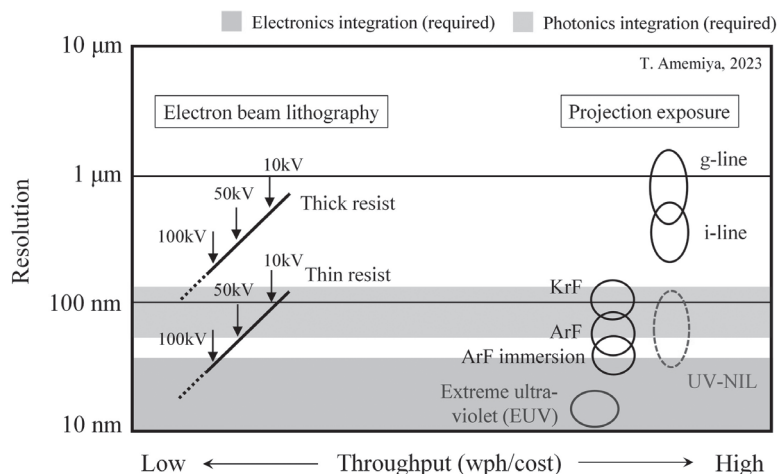


図2 代表的な露光技術の性能指数

また、最先端半導体の製造工程に導入されている極端紫外光（EUV）リソグラフィは、波長13.5 nmのEUV光（軟X線）を光源とし、0.33 NAの光学デバイスを有する縮小投影露光系を用いることで、L/Sのハーフピッチで14 nmのパターニングが可能となっている。EUVLの主な課題は、光源出力の向上により生産スループットを高めることであり、現在までに、90 W電源の場合で200 wphの性能が報告されている。

次に、研究用途に広く用いられている電子線露光方式は、電子線を使用してレジストに直接パターンを書き込むことで他の露光技術に比べて高い解像度（＜5 nm）と位置合わせ精度（＜10 nm）を実現できるが、装置の原理上、スループットは業界標準より大幅に遅くなる。その解決策として、マルチビーム描画技術なども導入されつつあるが、生産レベルのスループットという観点では、ArFリソグラフィ、EUVリソグラフィには遠く及ばない。

そのような中、ナノインプリント方式は高価な光源や複雑なレンズ投影系が不要であり、より安価に微細加工を可能とすることから、各種露光技術の代替として期待されている（図3参照）。しかしながら、図2の青帯域で示すとおり、微細化要求が激しい電子デバイス分野（半導体製造分野）においては、依然、ArFリソグラフィ（ダブルパターンニング使用）やEUVリソグラフィが業界のスタンダードであることは間違いなく、NILがその代替技術として取って代わることは容易ではない。その一方で、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では、NILが活躍できる余地が残されている。集積フォトニクス分野において特に高い解像度が必要とされる場面は、DFB（分布帰還型）レーザー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（図2の赤帯域を参照のこと）。そのため、上記プロセス工程では、NILの大面积転写性や高スループット性を大いに活かすことができ、かつコストの観点からも優位性があると考えられる。

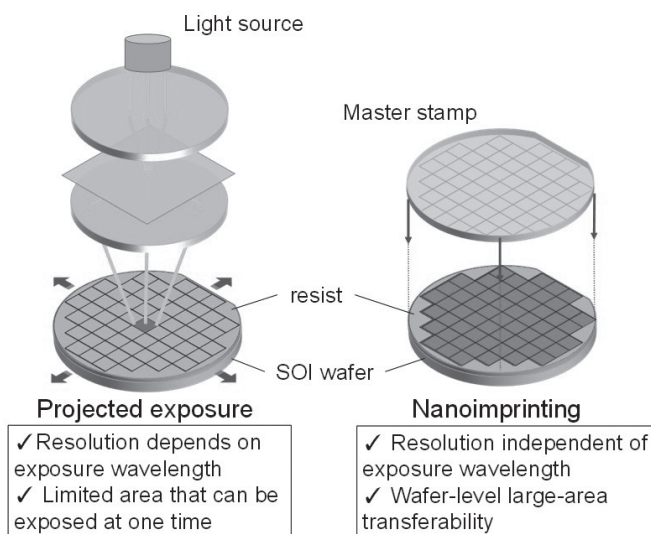


図3 投影露光方式とナノインプリント方式の違い：高価な光源や複雑なレンズ投影系が不要

2. UV-NILを用いた大面積集積フォトニクスプロセスの開発

実際に、シリコンフォトニクス^{8,9)}における製造の一工程としてUV-NILを導入する際には、それに適した光硬化性樹脂が必要となる。本研究では、東京科学大学内に設立した東京応化工業未来創造協働研究拠点において、シリコンフォトニクスプロセスと親和性のあるNIL用の光硬化性樹脂の開発を行った。

今回開発した、シリコンフォトニクスプロセスに適した光硬化性樹脂を図4に示す。成分a, bは、Si-O-Si結合、2重結合とカーボン比率を上げることによる化学的エッチング耐性の向上を目的としており、これに、光重合開始剤（成分c）、基板への密着を促進する添加剤やモールド表面からの離型を促進する添加剤（成分d）などを含んでいる。開発した光硬化性樹脂は、シリコンフォトニクスプロセスに必須となる以下3つの特徴を有している。

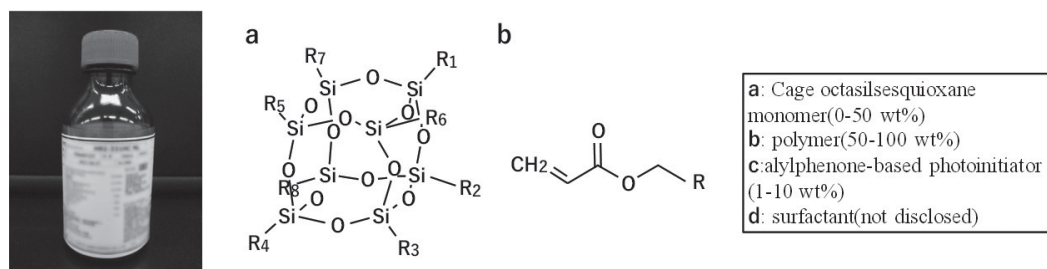


図4 開発した光硬化性樹脂

2.1 SF₆-C₄F₈混合ガスによるエッチング耐性

標準的な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のシリコン層をエッチングする。そのためこのプロセスで用いる光硬化性樹脂には、SF₆プラズマに対する高いエッチング耐性が要求されるとともに、併せて、SF₆-C₄F₈混合ガスによる変質性も極力抑えることが求められる。

2.2 O₂アッシングによる除去性

一般的なUV-NILで用いられる光硬化性樹脂は、主にフッ酸溶液処理により除去できるようデザインされている。しかし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。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。

2.3 ワーキングスタンプ剤との親和性

光硬化性樹脂には、スタンプモールド表面からの適切な離型が可能なデザインが必須となる。併せて、NILプロセス時に均一にUV照射を行う目的から、光硬化性樹脂の屈折率はスタンプモールドの屈折率と近いことが望ましい。今回は、ナノインプリント装置として世界シェアトップのEVGの装置を採用しており、シリカ系モノマーのEVG NIL UV/AS5をスタンプモールドとして用いている。そのため、光硬化性樹脂もそれに合わせた設計となっている。

3. UV-NILを用いた大面積集積フォトニクスプロセスの開発

図5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。本研究におけるインプリント工程は、EVG620 NT UV-NIL装置 (EV Group, St. Florian am Inn, Austria) 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。開発したプロセスは、「NIL工程」(図5a)と「光回路形成工程」(図5b)の二つのフローに分かれている。

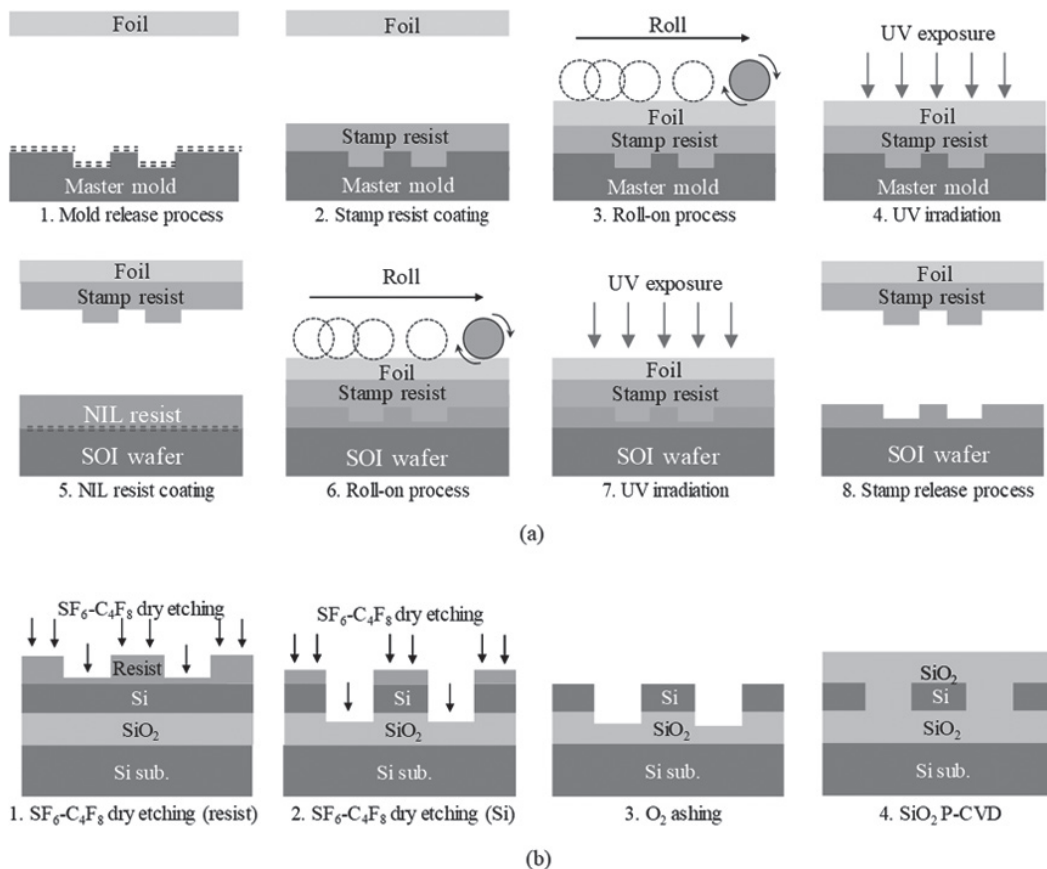


図5 UV-NILによるシリコンフォトニクスプロセス
(a) NIL工程 (b) 光回路形成工程

3.1 NIL工程

- 工程A：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に、離型剤およびワーキングスタンプ剤（EVG NIL UV/AS5）を塗布（図5aの1, 2）
- 工程B：上部から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を押し当てて、紫外線硬化させた後に離型（図5aの3, 4）
- 工程C：SOI（Silicon on Insulator）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印（図5aの5, 6）
- 工程D：UV照射を行った後、ワーキングスタンプを脱離させ、NILによって光回路パターンを形成（図5aの7, 8）

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。本プロセスでは、光硬化性樹脂の膜厚および充填率、回路レイアウトなどを最適化することで、膜厚20 nm以下の残膜制御が可能となっている（図6a）。

3.2 光回路形成工程

- 工程A：SF₆-C₄F₈混合ガスによるドライエッチングにより光硬化性樹脂の残膜除去（図5bの1）
- 工程B：連続してSF₆-C₄F₈混合ガスによるドライエッチングにより、シリコン層をエッチング（図5bの2）
- 工程C：O₂アッシング処理により、マスクとして用いた光硬化性樹脂を除去（図5bの3）
- 工程D：プラズマCVDにより、上部クラッドとしてSiO₂を堆積（図5bの4）

NILによるパターン形成後は、光硬化性樹脂の除去にO₂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である。エッチング工程では、十分な垂直性を維持したまま、標準的なシリコン導波路パターンを形成可能であるとともに（図6b）、O₂プラズマアッシングによってエッチング後の残留樹脂を除去できていることが分かる（図6c）。

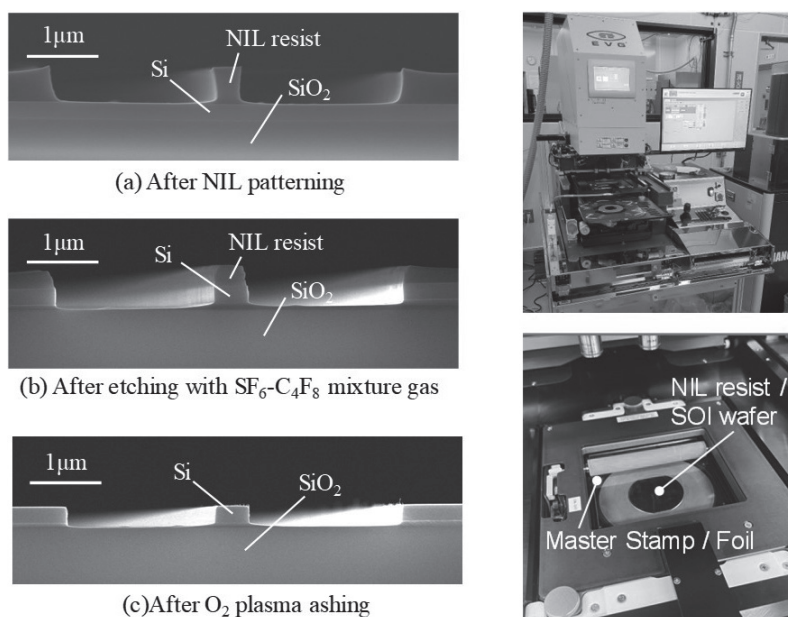


図6 各工程における走査電子顕微鏡画像
(a) NILパターン形成後 (b) SF₆-C₄F₈エッチング後 (c) O₂プラズマアッシング後

4. 開発プロセスで作製したシリコン導波路の伝搬特性

図7に今回開発したプロセスで作製したシリコン導波路の損失測定の結果を示す。長さの異なる導波路の透過強度の傾きより単位長さ当たりの導波路損失を求めたところ、1.59 dB/cmとなった。これは、従来のArFリソグラフィを使用する90 nm CMOS試作ライン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。

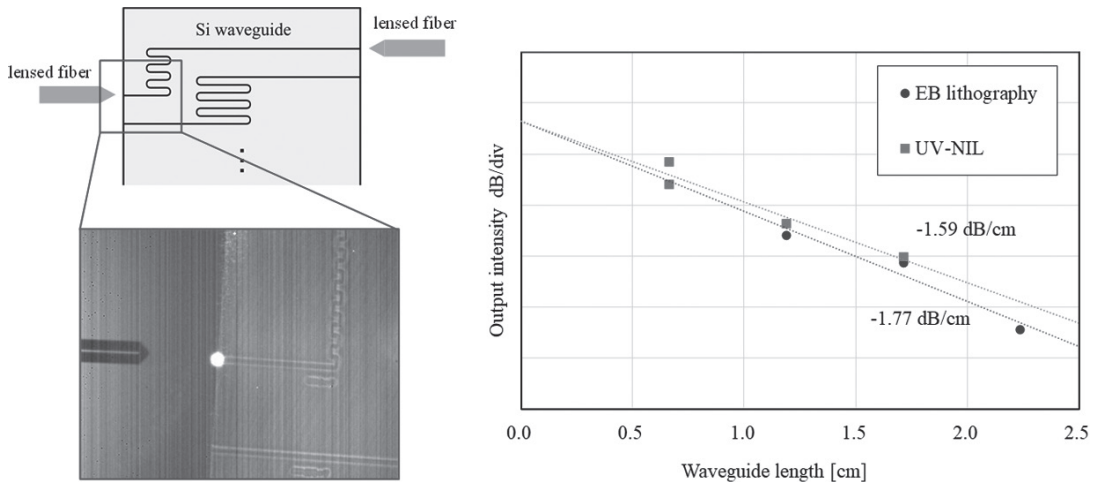


図7 NILによって形成されたシリコン導波路における伝搬特性

おわりに

シリコンフォトニクスは、高速、高帯域、低エネルギーであることから、将来のデータセンターとデータ伝送のボトルネックを解決するための重要な技術の1つと見なされている。そのような中、EUVなどの超高解像露光技術を必要とする先端電子デバイス・集積回路分野と比較すると、フォトニクス分野では露光プロセスにそれほど高い解像度を必要としないため、NILの大面积転写性や高スループット性を大いに活かすことができる可能性がある。本技術により、シリコンフォトニクスを扱っている各ファウンドリの標準プロセスラインへのNIL導入が期待されるとともに、光電融合も見据えたシリコンフォトニクス分野拡大に貢献できると思われる。

参考文献

- 1) 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).
- 2) H. Schiff, "Nanoimprint lithography: An old story in modern times? A review," *J. Vac. Sci. Technol.* B 26, 458 (2008).
- 3) M. Eibelhuber, T. Uhrmann, T. Glinsner, P. Lindner, "Nanoimprint Lithography enables cost effective photonics production," *Photonics Spectra* 49, 34 (2015).
- 4) 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).

- 5) 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).
- 6) B. Dielacher, M. Eibelhuber, T. Uhrmann, "High-volume processes for next-generation biotechnology devices," *Solid State Technol.* 59, 11 (2016).
- 7) M. Kast, "High Precision Wafer level optics Fabrication and Integration," *Photonics Spectra* 44, 34 (2010).
- 8) <https://www.aimphotonics.com/>
- 9) <https://www.advmf.com/>

