Press Release

2025 年 1 月 29 日
東京科学大学
東京応化工業株式会社

UV ナノインプリントを用いた シリコンフォトニクス半導体プロセスを開発

－光電融合も見据えたシリコンフォトニクス分野拡大へ－

【ポイント】

〇シリコンフォトニクスプロセスに適したナノインプリント用の光硬化性樹脂を開発。
〇UV ナノインプリントを用いた大面積・高スループットのシリコンフォトニクスプロセスを確立。
〇電子線描画による光導波路と変わらない特性を持つシリコン導波路の作製に成功。

【概要】

東京科学大学（Science Tokyo）* 工学院 電気電子系の雨宮智宏准教授、永松周学士課程学生、西山伸彦教授らは、東京応化工業株式会社の森莉紗子、藤井恭、浅井隆宏、塩田大らと共同で、UV ナノインプリント（UV-NIL）を用いたシリコンフォトニクスプロセスを開発しました。

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います。特に UV-NIL は実用的な量産技術として導入実績があります。

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 用の光硬化性樹脂の開発を行いました。さらに、**SmartNIL®技術**（用語 1）に基づいたロールオンプロセスの最適化を実施し、従来の 90 nm **CMOS プロセスライン**（用語 2）や**電子線描画**（用語 3）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ました。今回開発したシリコンフォトニクスプロセスでは、UV-NIL の大面積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ます。

本研究は、東京科学大学内に設立された東京応化工業未来創造協働研究拠点において行われたもので、開発したナノインプリント用の光硬化性樹脂およびプロセスレシピは外部提供が可能です。併せて、本研究成果は、2025 年 1 月 25～30 日（現地時間）に米国サンフランシスコで開催される「SPIE Photonics West」にて報告されます。

＊2024 年 10 月 1 日に東京医科歯科大学と東京工業大学が統合し、東京科学大学（Science Tokyo）となりました。

●背景

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や、大面積転写性や高スループット性など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ます。特に**ソフト UV-NIL**（用語 4）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ります。さらに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ます。

そのような中で、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も、NIL を導入できる可能性があります。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**（用語 5）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**（用語 6）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ます（図 1 の赤帯域）。そのため、上記プロセス工程では、NIL の大面積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ます。

本研究ではこうした背景から、集積フォトニクスの一分野として近年発展が著しいシリコンフォトニクスに着目して、実際に UV-NIL を導入したプロセスを開発しました。

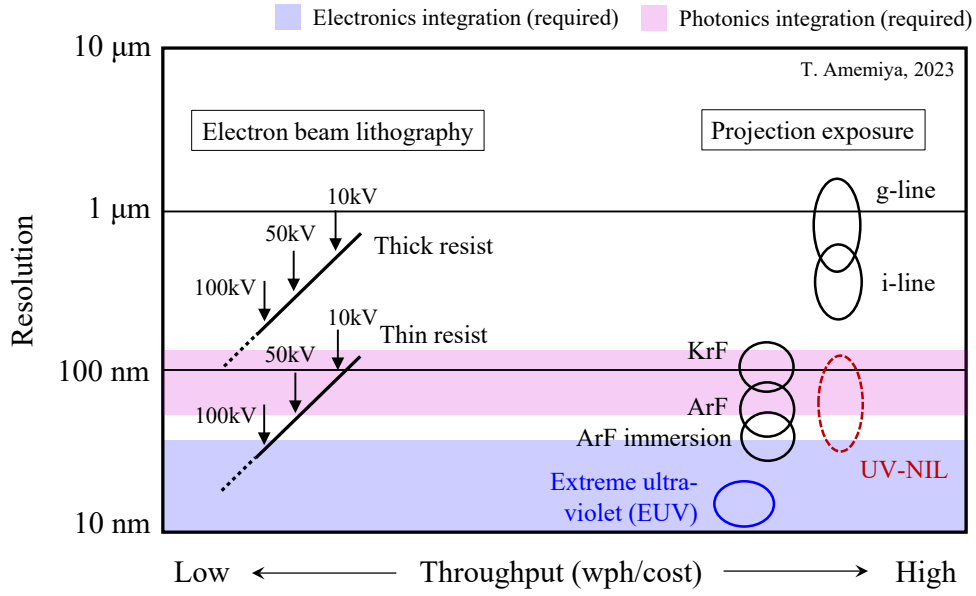

図 1　各種リソグラフィ技術の性能指数

●研究成果

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行いました。これにより、開発したプロセスを用いて作製したシリコン導波路では、従来の 90 nm 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ました。

成果 1：光硬化性樹脂の開発

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（図 2）は、**UV-NIL の標準仕様**（用語 7）に加えて、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ます。

(1) SF_6-C_4F_8 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、SF_6-C_4F_8 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 のシリコン層を削りきります。そのため、このプロセスで用いる光硬化性樹脂には、SF_6 プラズマに対する高いエッチング耐性が要求されます。併せて、SF_6-C_4F_8 混合ガスによる変質性も極力抑えることが求められます。

(2) O_2 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ます。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 SiO_2 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ありません。そのため、有機溶剤処理もしくは O_2 プラズマアッシングで除去できることが必須となります。

(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ります。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です。今回は、EVG のナノインプリント装置をベースとしており、スタンプ剤として EVG NIL UV/AS5 を用いています。

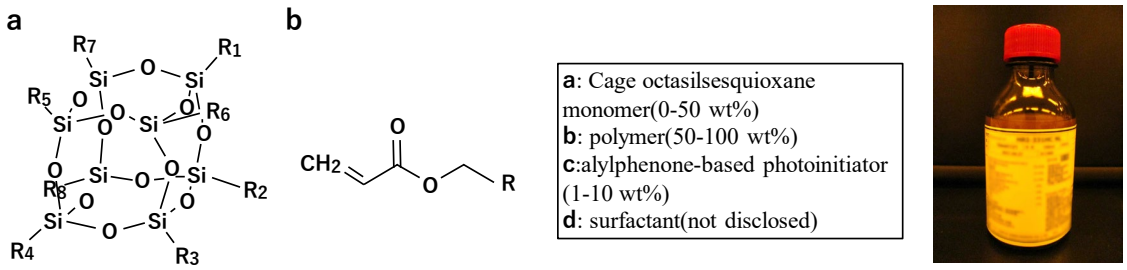

図 2　開発したシリコンフォトニクスプロセスに適した光硬化性樹脂（各成分の比率は、SF_6-C_4F_8 混合ガスによるドライエッチング条件に対して最適化している）

成果 2：UV-NIL を用いたシリコンフォトニクスプロセスの確立

今回開発したシリコンフォトニクスプロセスは「NIL 工程」（図 3a）と「光回路形成工程」（図 3b）の 2 つのプロセスフローに分かれています。

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 3a 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 3a 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ンコートした後、先ほど作製したワーキングスタンプを押印（図 3a 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 3a の 7, 8）

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ます（図 4a）。

光回路形成工程

工程 A：SF_6-C_4F_8 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 3b の 1）

工程 B：連続して SF_6-C_4F_8 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 3b の 2）

工程 C：O_2 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 3b の 3）

工程 D：プラズマ CVD により、上部クラッドとして SiO_2 を堆積（図 3b の 4）

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の手順です。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できることを確認しました（図 4b）。

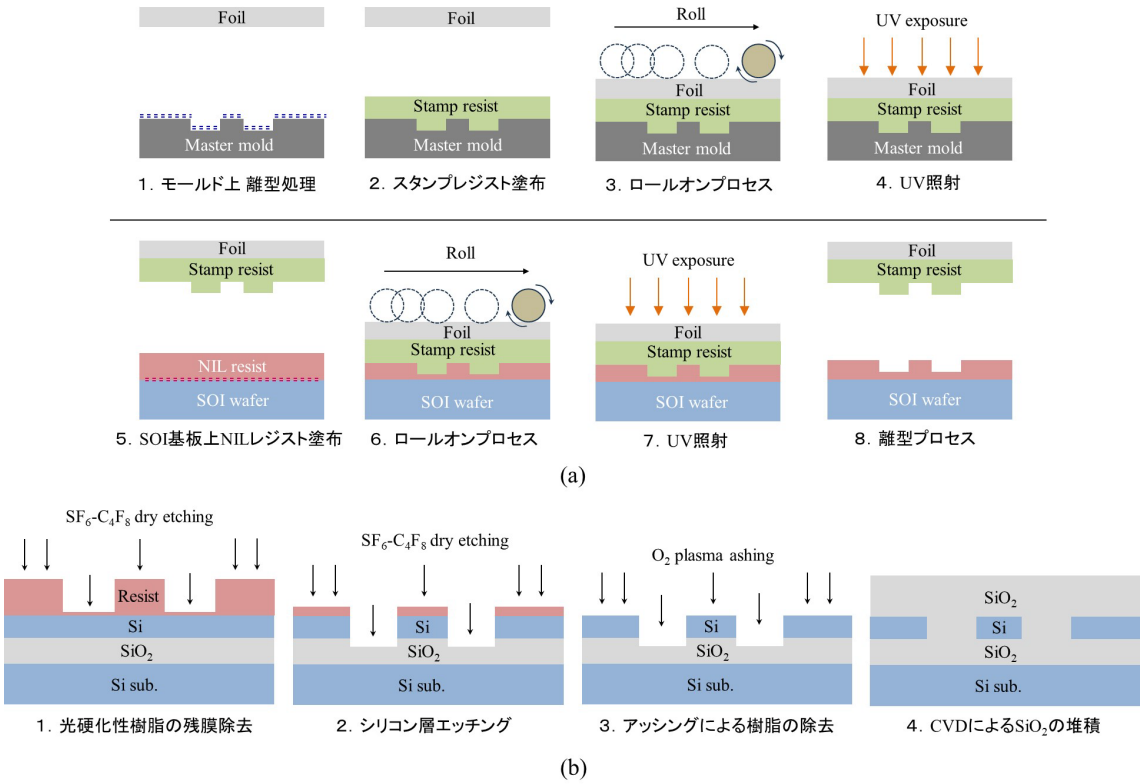

図 3　UV-NIL によるシリコンフォトニクスプロセスの（a）NIL 工程と（b）光回路形成工程

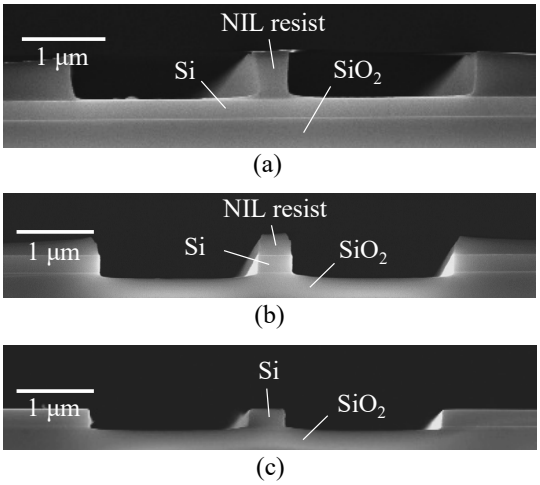

図 4　各工程後の走査電子顕微鏡画像　（a）NIL によるパターン形成後、（b）SF_6-C_4F_8 混合ガスによるエッチング後、（c）O_2 プラズマアッシング後

成果 3：開発プロセスで作製したシリコン導波路の伝搬特性

今回開発したプロセスで作製したシリコン導波路の伝搬特性を評価した結果、波長 1,550 nm の TE モード光に対する単位長さ当たりの伝搬損失は 1.6 dB/cm 程度となりました（図 5）。これは、従来のドライ ArF が用いられる 90 nm CMOS 試作ラインや電子線描画を用いて作ら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しています。

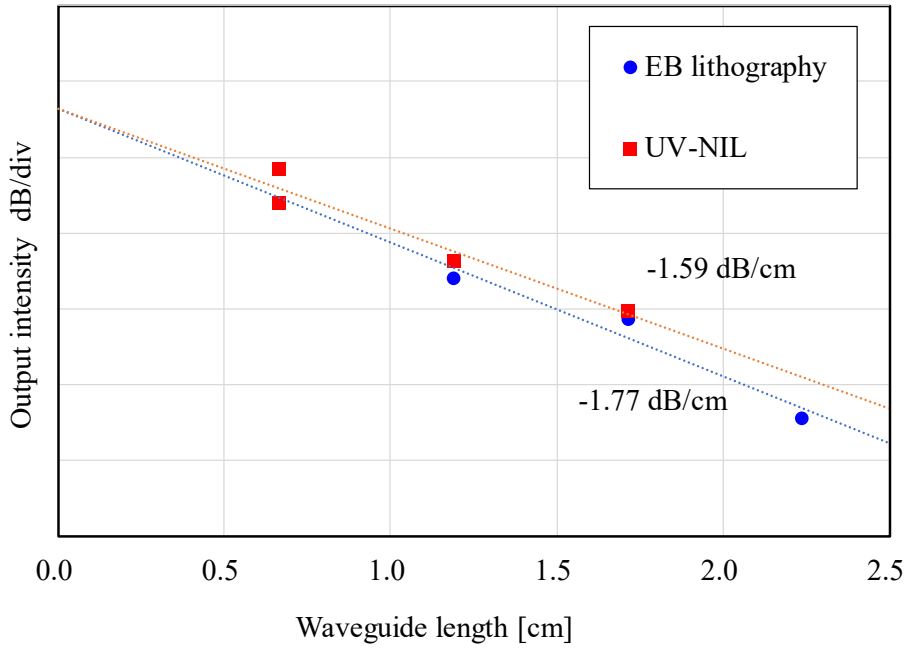

図 5　開発プロセスで作製したシリコン導波路の伝搬特性

●社会的インパクト

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一つと見なされています。本技術は、シリコンフォトニクス関連のデバイス開発と産業応用を推進する上での一助となり、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考えられます。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、本学のミッションである「科学の進歩」と「人々の幸せ」とを探求し、社会とともに新たな価値を創造し続けます。

●今後の展開

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 の大面積転写性や高スループット性を大いに活かすことができます。将来的には、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 導入も期待されます。また、従来の露光法では難しい 3 次元露光も可能であり、それを積極的に利用した新たな光デバイスの実現も示唆されます。

●付記

本研究は、以下の援助によって実施されました。

・東京応化工業未来創造協働研究拠点
研究課題：「半導体製造工程に用いる材料や化学薬品、加工技術を基軸とした、フォトニクスデバイスやライフサイエンス、カーボンニュートラルに関する研究」
拠点長：西山伸彦 東京科学大学 教授
副拠点長：鳴海裕介 東京応化工業 新事業開発本部 本部長

・東京工業大学「東工大の星」特別賞（STAR）
研究代表者：雨宮智宏 東京科学大学 准教授

【用語説明】

(1) **SmartNIL®技術**：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 ナノインプリントを行う技術。半導体装置メーカーである EV Group 社が開発した。

(2) **CMOS プロセスライン**：シリコン LSI の試作ラインを使って光集積回路を作る技術。KrF エキシマレーザー光（波長 248 nm）、ArF エキシマレーザー光（波長 193 nm）を用いた露光を基本とする。90 nm ラインでは、ArF を導波路作製に主に用いられる。

(3) **電子線描画**：電子線に感光する樹脂薄膜に微細パターンを描画する技術。主に、基板に直接描画することによる少量多品種の試作品の開発や、半導体チップのレチクルの作製に用いられる。

(4) **ソフト UV-NIL**：ポリマーで形成された柔軟な透明スタンプを使用してナノインプリントを行う技術。

(5) **DFB（分布帰還型）レーザー**：半導体レーザーの一種で、レーザー中に設けた周期的構造によって不要な波長の発振を抑圧し、単一波長の光出力を実現する。通信用の半導体レーザーの多くに用いられる。

(6) **グレーティングカプラ**：光ファイバとシリコン基板上の SOI 導波路を効率的に結合するためのデバイス。基板導波路に回折格子状の適切な周期構造を与えることによって、光ファイバから入射した光を基導波路板内に回折させ、光を結合する。

(7) **UV-NIL の標準仕様**：反応性イオンエッチング耐性を付与するためにシロンキサンを含有した重合性モノマー、硬化樹脂の力学強度や熱耐性を付与する架橋剤分

子、光重合開始剤、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などを含んでいる。

【技術資料・技術提供】

＜開発したナノインプリント用の光硬化性樹脂＞

東京応化工業株式会社からサンプル品として外部に提供可能

＜開発したシリコンフォトニクスのプロセスレシピ＞

東京科学大学からデータシートとして外部に提供可能

【外部発表】

“Development of silicon photonics process using UV nanoimprinting,” SPIE Photonics West 2025, Silicon Photonics XX 13371-42 (2025).
https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west
https://spie.org/photonics-west/presentation/Development-of-silicon-photonics-process-using-UV-nanoimprinting/13371-42

【研究者プロフィール】

雨宮 智宏（アメミヤ トモヒロ） Tomohiro AMEMIYA
東京科学大学 工学院電気電子系 准教授
研究分野：フォトニクス
HP：https://amemiya-lab.net/

森 莉紗子（モリ リサコ） Risako MORI
東京応化工業株式会社
研究分野：高分子化学

【問い合わせ先】

(研究に関すること)
東京科学大学 工学院 電気電子系 准教授
雨宮智宏
Email: amemiya.t.e262@m.isct.ac.jp
TEL: 03-5734-2555

東京応化工業株式会社 広報 IR 部
Email: ir@tok.co.jp
Tel: 044-435-3000

（報道取材申し込み先）
東京科学大学 総務企画部 広報課
申し込みフォーム：https://forms.office.com/r/F3shqsN7zY
Email: media@ml.tmd.ac.jp
TEL: 03-5734-2975　FAX: 03-5734-3661

東京応化工業株式会社 広報 IR 部
Email: ir@tok.co.jp
TEL: 044-435-3000