

EV GROUP® | 技術情報

ナノインプリント・リソグラフィを用いた メタレンズ製造



ナノインプリント・リソグラフィを用いた メタレンズ製造

イントロダクション

メタレンズ市場とアプリケーション

メタレンズやメタ構造を利用、あるいは集積化することは、フォトニクス・アプリケーションの分野で最もエキサイティングな技術の1つとなっています。これらの技術は光学部品の設計や実装方法を根本的に変えてしまうため、センサー、エミッター、カメラ、ディスプレイ、AR/VRグラスなど、あらゆる光学デバイスに大きな影響を与える可能性があります。メタレンズは、洗練された高度なナノ構造で構成され、屈折レンズと同様に光の収束や発散が可能です。これまでにない非常に優れた利点があります。特記すべき点は、その薄さであり、故に、平面レンズとも呼ばれています。この薄さにより、レンズ積層のサイズや複雑さを大幅に低減できるため、メタレンズのモジュール統合は理想的な候補となります。その上、収差がなく、非常に高い開口数を有し、または偏光に依存しない集光が可能となるため、最高の性能を持つレンズを作成することができます。設計の柔軟性によってこれらすべての利点を得られるため、メタレンズは次世代の光学部品であるとみなされています。概してメタレンズは、多くのアプリケーションにおいて従来のマイクロ

ロ光学素子や光学素子の置き換えと考えられていますが、いくつかの付加機能は従来のマイクロ光学スタックやモジュールを補完するものでもありません。

一般的に、これらの高度に洗練されたメタレンズやメタ構造を作成するには、精密で高解像度が可能となるリソグラフィ技術が不可欠です。典型的なデザインは、直径、ピッチ、形状が異なるピラーで構成され、これらのデザインに応じた光学材料で製造されます。最高の性能を発揮する構造を製造するためには、優れたパターン忠実度と30nmまでの物理的解像度が求められます。これらの要件を満たすリソグラフィ技術は多くない中で、NILと高品質の電子ビームマスタリングとの組み合わせは、メタ構造の設計自由度を大きく制限せずに大量生産を可能にする唯一の方法です。したがって、メタ構造の潜在能力を最大限に引き出し、かつ、ウェーハレベルでの大量生産を実現するには、高品質のマスタリング技術とそれに続く効果的で信頼性の高い複製プロセスの適切な組み合わせが必要となります。

そこで、EVGのNILテクノロジーとトッパンの高品質マスタリングの組み合わせが実現いたしました。

本稿では、このコラボレーションと共同の取り組みがメタレンズや将来のフォトニクス製造を可能にする理由と方法を示します。

モチベーション

メタレンズなど将来のフォトニックアプリケーションで、特に微細かつ任意の形状パターンを従来のリソグラフィ技術で作成することは、今まさに技術的な限界に達しつつあります。そこで、複雑な構造体を高解像度でパターン形成できるNILは、この市場にとって有力な代替手段となります。この技術により、洗練された構造を効率的に大面積で複製することができ、設計に対する制約が少なくなるため、非常に合理的なプロセスフローで試作と量産の両方に適用することが可能となります。

半導体市場向けフォトマスクのリーディングサプライヤーであるトッパンとの協業は、NILをフォトニクス製造の業界標準プロセスとして確立することを目的としています。この協業によって、高品質のメタレンズとメタ構造の製造に必要なプロセス能力を提供するとともに必要なインフラを産業規模で導入させることにより、マスタリングとそれに続くNIL技術を、HVMで要求される品質と生産量まで引き上げることが可能であることを示しています。

特長

- メタレンズのマスタリングとそれに続く複製について、業界で実証済みのプロセスチェーン
- プロセスの組み合わせにより、HVMまでスケールアップが可能
- さまざまな異なる形状に対する高いパターン忠実度。例えば三角形、円形構造、ひし形、ドーナツ型、長方形型などを任意の方向に配置が可能
- 最小65nmまでの寸法を実現
- アスペクト比 1:4



図 1: HVM 用メタレンズアレイの25インプリント

NIL プロセス チェーン: シングルマスターから HVM まで

高品質のメタレンズを大量生産するためには、必要なすべての製造工程を完全に理解し、プロセスチェーン全体にわたって品質を維持することが重要です。必要となる主な製造手順を次の順序で説明します：

1. 6インチ角石英テンプレート上にシングルダイを電子ビームでマスターリング – トップラン提供
2. 200mmまたは300mmウェーハスケールでのS&Rマスターリング – EVG提供
3. NILを用いた複製による量産 – EVG提供

マスターリング

トップランのNILマスター製造用POR(プロセス・オブ・レコード)は、フォトマスク製造の基本工程を活用して開発されました。これにより、もともと半導体業界向けフォトマスク製造のために開発された装置とプロセスをすることができ、数十年にわたる経験と優れた機能の恩恵を享受できます。ここでは、製造フローの主なステップの概要を示します(図2も参照)。まず、お客様が光学製品の設計データを転送することから始まります。そして、そのデータは、電子ビーム用パターンジェネレーターによってフォーマット変換され、ブランク基材にパターンが露光されます。

メタレンズ用NILマスターの製造には、6インチ角の石英フォームファクタが使用されます。しかし、これらに必要な装置とプロセスはすべて、同様のものを200mmの円形フォームファクタでも利用可能であることにも及しておきます。石英プレート(またはブランク)は、ハードマスクとして機能するクロム(Cr)フィルムでコーティングされています。

電子性線に感光特性を持つレジストをクロム上に塗布し、電子線を照射することによって露光された領域の化学的特性が変化し、後の現像工程で溶解するようになります。この化学反応は、露光後のベーク工程によって増幅されます。

レジストを除去した領域ではクロムがエッチング(除去)され、露光されたパターンがCrハードマスクに転写されます。

パターンニングされたハードマスクは、さらに石英へパターン転写するために使用されます。図2のNILマスター製造の概略フローにおいて、クロム開口部のみが選択エッチングによって必要な深さまでエッチングされます。このエッチングプロセスの選択性により、クロムは変化しないことが保

証されます。つまり、サイズや形状に変化はなく、すべてのパターンが規定された深さまで石英にエッチングされます。石英が規定の深さまでエッチングされた後、Crハードマスクは除去されます。マスターの重要パラメータについて、パターン寸法(critical dimensions)はSEM計測を用い、深さはAFM計測によって管理されます。

以下のデータはトップランとEVGが共同で設計・製造したメタレンズ用デモマスターで収集したものです。一般的なメタレンズ設計は、その機能を説明するために実現されました。結果を次のページ以降に示します。

最初に示した結果は、さまざまなサイズのドットパターン寸法(CD)の均一性です。大きなピラー(CD=300nm)から小さなピラー(CD=70nm)まで、すべての設計サイズにおいて、マスター全面で同様に優れたCD制御が明確に確認できます。

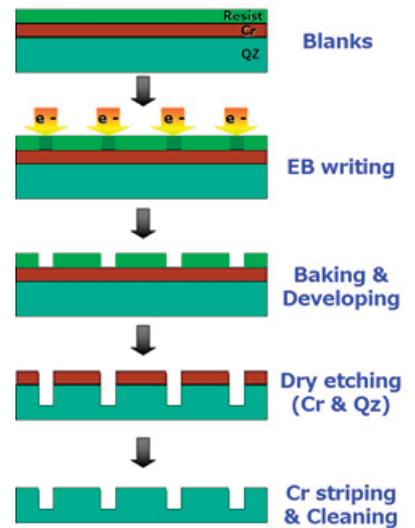


図2: NILマスター製造の概略フロー

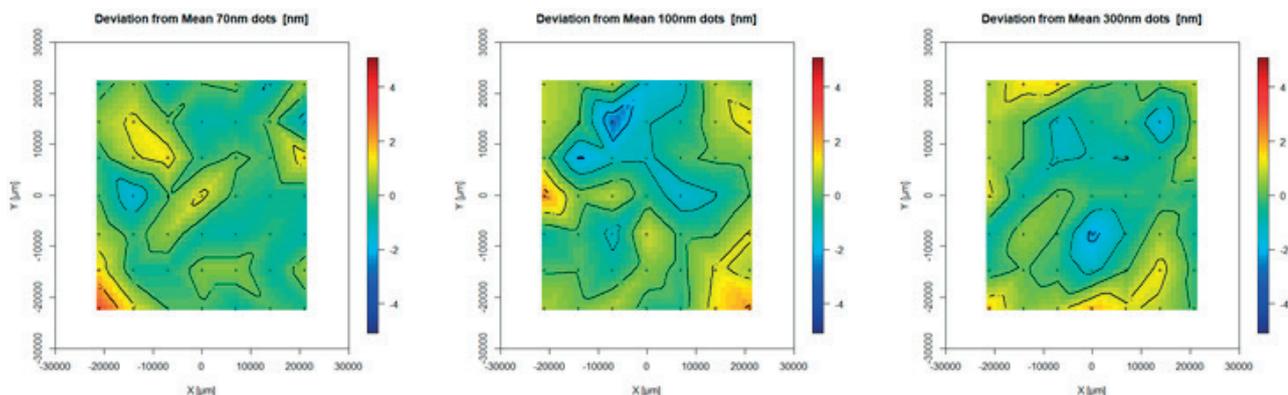


図3: NILマスターにおけるパターン寸法の面内均一性

マスターの最も重要なパラメータは石英のエッチング深さです。メタレンズ用デモマスターは200nmまでエッチングされます。マスター全領域で最適な均一性が得られています。

さまざまなタイプのメタ原子に対し、CD-SEM画像を用いて解像度の品質を評価しました。これらの画像は、最良のコントラストを得るために石英エッチング後、ハードマスクを除去する前に撮影されました。ハードマスク除去後も、解像性能やパターン形状は変わりません。よって、これらの画像は最終的な石英ピラーを表しています。これらの画像の例を以下に示します。

マスター上で製造可能なメタ原子の形状と最小サイズのリストはデザインキットとして提供しています。さらに、インプリントマスターが正しく機能することを保証するためには、パターンの完全性と欠陥レベルを考慮する必要があります。メタレンズ設計の大半は、その複雑さゆえに、フォトマスクの標準的なフルパターン検査によって評価することができません。しかし、フォトマスク用に確立された製造環境が利用（または転用）可能、という点は有益であると言えます。優れた清浄度レベルとすべてのプロセスで確立された管理スキームにより、低欠陥レベルが保証されたNILマスターが製造されます。

つまり、トップランの優れた技術力と数十年にわたるフォトマスク製造の経験が、NILマスター製造のニーズに最適な形で応え、最上級のマスターを確実にお客様に提供します。

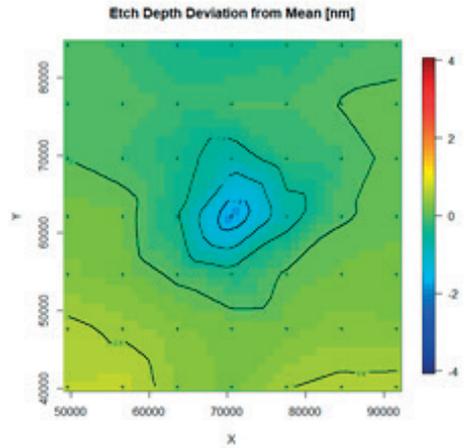


図 4: NILマスター面内の石英エッチング深さ均一性

ステップ&リピート(S&R)マスタリング

メタレンズの生産量を増やすには、時間とコスト効率の高いスケールリングが鍵となります。高品質なシングルダイマスターの製造時間はパターン領域のサイズに直接関係するため、コストもパターン領域に比例することを意味します。そこで、ステップ&リピート(S&R)方式によりトップランのシングルダイマスターをスケールリングすることで、ウェーハ上で効率良く大量生産が可能になると期待されています。

これを実現するために、EVG®770ステップ&リピート(S&R)NIL装置により6インチ角の石英マスターを200mmまたは300mmのウェーハ上に複数回複製し、フルエリアのウェーハスケール・マスターを作成します。この装置は、レジスト滴下、位置合わせ、インプリント、および離型を全自動で行うことができます。これは、高品質かつオリジナルのマスターに可能な限り近い忠実度で複数のパターンを作成するために必要です。これにより、NIL複製に使用されるフル・ウェーハ・スケール・マスター(S&Rマスター)を作成するための製造時間が大幅に短縮されます(図5を参照)。

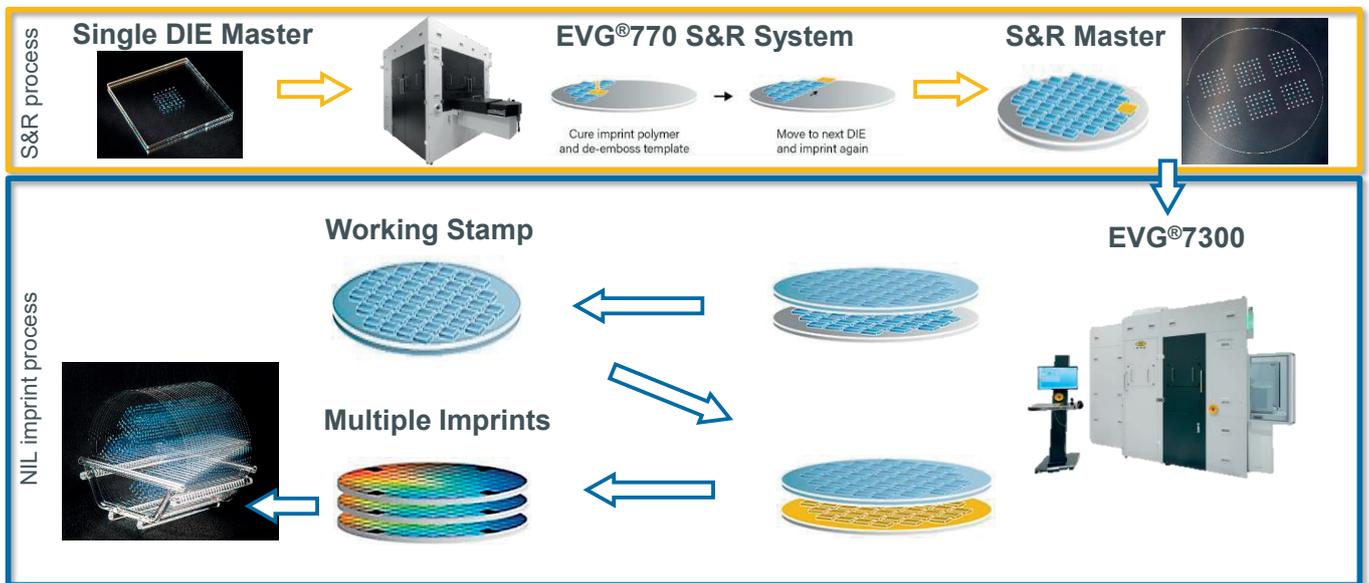


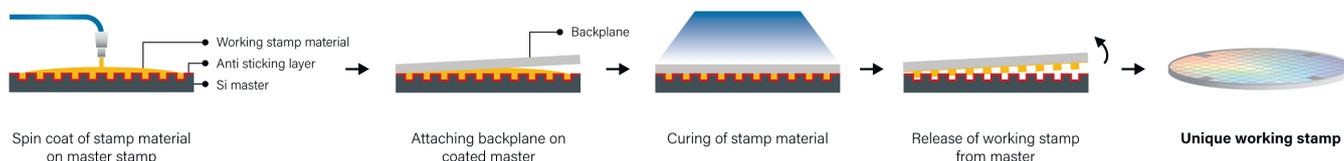
図 5: S&RおよびNIL複製プロセスフローの概略図

NIL複製

SmartNIL®テクノロジーは、その後に続くウェーハレベルでのNIL複製プロセスに使用されます。プロセスフローは2つのステップで構成されます: まず、前の工程で製造されたS&Rマスターから複数の安価なポリマー製ワーキングスタンプ(WS)を製造し、第2ステップでそれらを実際に使用します。この2ステップ方式により、元のテンプレートの磨耗が軽減され、達成可能なインプリント数が飛躍的に増加するため、全体的な生産経済性が向上します。欠陥のあるスタンプは迅速かつ低コストで交換できるため、大量生産の際には特に有利となります。

NILプロセスの詳細を以下の図 6 に示します：欠陥のないWSを製造するために、S&Rマスターにスピン塗布で離型層を形成します。次に、同じくスピン塗布プロセスによって、WS材料をマスター上に直接塗布します。続いて、透明なSmartNILバックプレーンを塗布済みのマスターに取り付けます。そして、WSポリマーをUV LED を用いて硬化し、最後にマスターから離型したあとに、実際のSmartNILインプリントプロセスを実行します。これらを行うには、WS製造と同じプロセス、例えばスピン塗布などを用いて、専用の材料基板上に塗布します。WS と材料を塗布した基板を接触させます。WS製造と同様に、この工程の後にUV硬化と離型が行われ、最終構造（メタレンズ）で複数のインプリントが行われます。SmartNIL複製のため、WSを複数インプリントで再利用する方法は、プロセス効率を向上させ、既に大量生産の現場で実証されています。

SmartNIL® - Stamp fabrication



SmartNIL® - Imprint

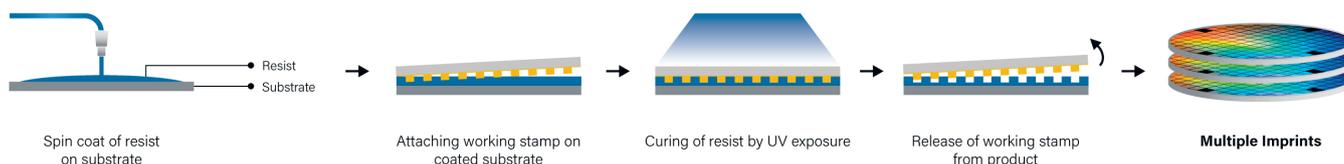


図 6: SmartNIL®レプリケーション・プロセス・フローの詳細

上記に示すSmartNILインプリントプロセスは、ワーキングスタンプの製造とそのあとに続くウェーハへのインプリントの2つの工程に分かれますが、全てのプロセスは同一装置で行われます。EVG®7300 SmartNILは200mmまたは300mm のウェーハを使用してこの作業を行うことができます。

最高の光学品質を達成するために、このメタレンズ製造工程に続き、エッチングプロセスを行うのが一般的です。NILインプリントがエッチング用マスク（パターン転写）として使用されるため、このプロセスは「犠牲層インプリント」とも呼ばれます。その優れた材料特性により、最も一般的とされている材料は、アモルファスシリコン（赤外線用）とiO2（可視光用）です。ただし、すべての半導体および誘電体材料はメタレンズやメタサーフェスのアプリケーション範囲内にあります。

一方、研究開発では、永久層（または直接）インプリントが勢力を増しており、その多くは高屈折率レジストと組み合わせで行われています。このプロセスでは、エッチング工程が不要なため、追加コストをかけずに複雑な構造を実現できるという利点があるためです。

プロセス結果

前述したプロセスのコスト効率とHVM時の生産性だけを重視すれば良いわけではなく、全行程を通してパターンの忠実度とメタレンズ構造の品質を維持することが極めて重要となります。そのため、複製された構造体は、高さや寸法、全行程を通しての安定性、再現性などの点でより詳細に評価が行われます。

マスターから最終プリントまでのパターン忠実度

プロセス全体におけるパターンの安定性を実証するために、原版となる石英マスター上のパターン寸法（CD） / 高さ、それをウェーハレベルに完全実装したS&Rマスターおよび最終インプリント後の構造の高さを比較します。異なる形状による影響を確認するために、実パターンを変えて調査を行いました。S&Rプロセス工程では、代表例としてダイ1とダイ6を測定します。

プロセスチェーン	円形ピラーの高さ (AFM) 平均値	ドーナツ型ピラーの高さ (AFM) 平均値
トッパン マスターテンプレート	196 nm	194 nm
S&Rフル実装ウェーハ - ダイ 1	190 nm	189 nm
S&Rフル実装ウェーハ - ダイ 6	192 nm	188 nm
最終インプリント	184 nm	180 nm

この数字は、ダイ全体のばらつきが5%未満（計測誤差の範囲内）であることを示しています。初期のマスターから最終インプリントまでの高さの減少は、材料の収縮によって説明されます。この要素はマスター設計時に既に考慮されており、最終的には非常に再現性の高いダイがウェーハレベルで複製されます。さらに、構造物（ピラーなど）の欠落も見られず、全体的に優れたパターン忠実度が得られていることがわかります。

再現性 – インプリントシリーズ

原版マスターから最終インプリントまでのパターン忠実度に加えて、特に注目すべきなのは最終インプリント(シリーズ)自体の再現性です。これを実証するために、EVG UV-A樹脂を使用してNIL 複製を25回実行しました。インプリント間の品質を証明するために、25枚すべてのウェーハのパターンの高さを測定し、図7にグラフで示しました。

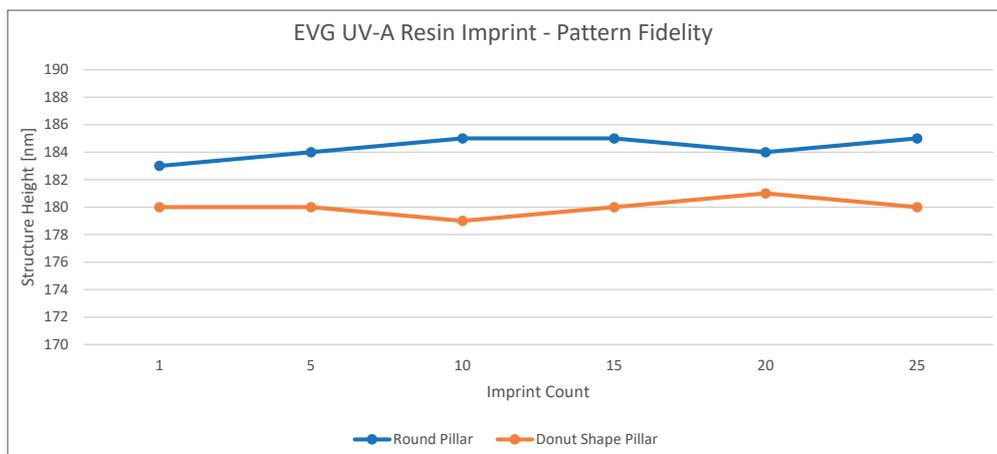


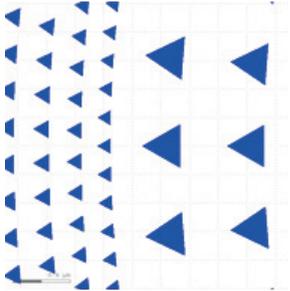
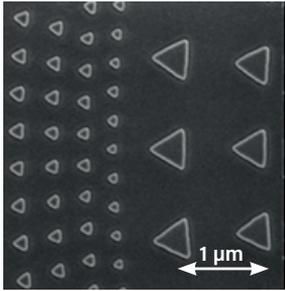
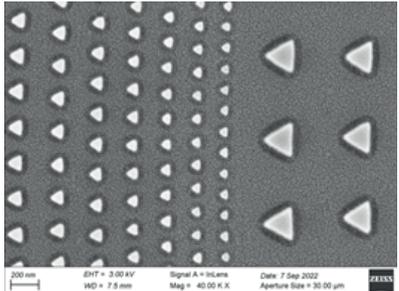
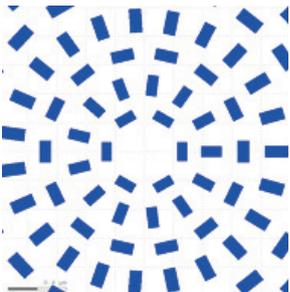
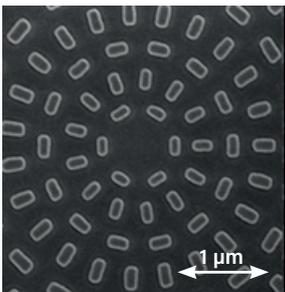
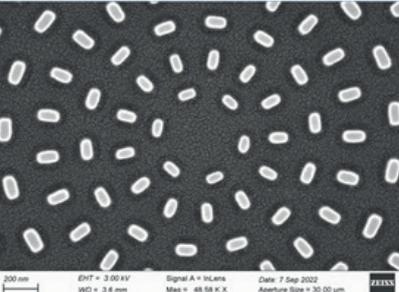
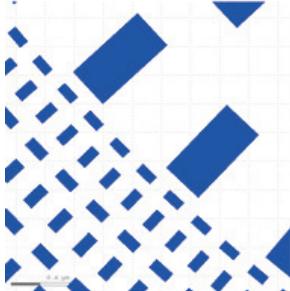
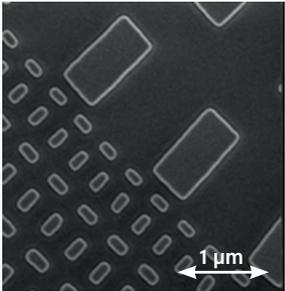
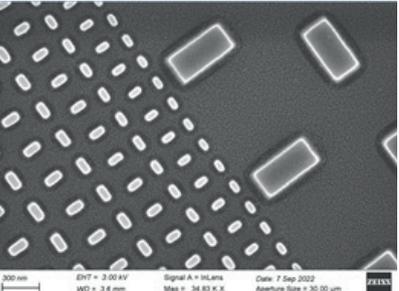
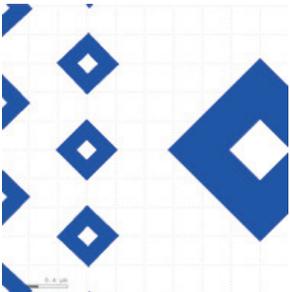
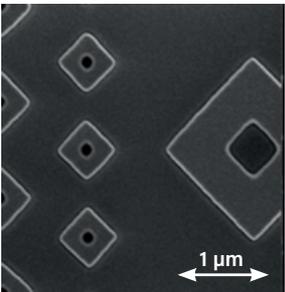
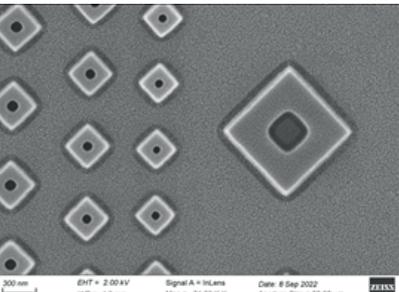
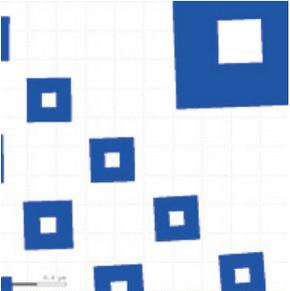
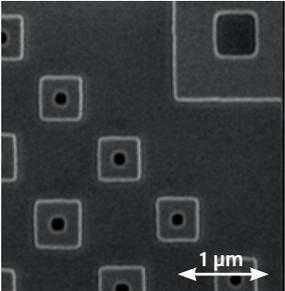
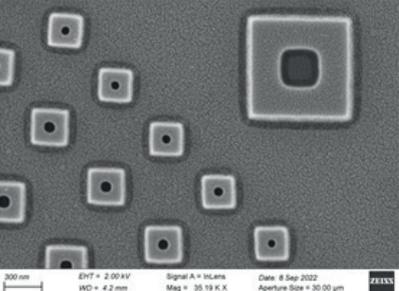
図 7: 25回インプリントした際の構造体の高さ(インプリントシリーズ)

数ナノメートルのわずかな変動はあるものの、構造の高さについて体系的な劣化は観察されず、プロセスチェーン全体に渡り優れた再現性、安定性、品質が改めて強調されています。

設計からS&Rマスターを通じ、複数のインプリントウェーハを作成した場合の比較画像

結果を実証するために、初期設計、マスター、インプリントのSEM 画像を撮影しました。

設計	マスター	インプリント

設計	マスター	インプリント
		
		
		
		
		



これらの機能へのアクセス方法

以下の図8は、これらの機能を利用するための案内と、トッパン及びEVGが新たなイノベーションを実現する機会をどのように提供しているか、またここで説明したテクノロジーを活用して新たなアイデアをどのように立ち上げるかを示しています。これにより、お客様のご要望に応じたオーダーメイドのソリューションを提供することができます。

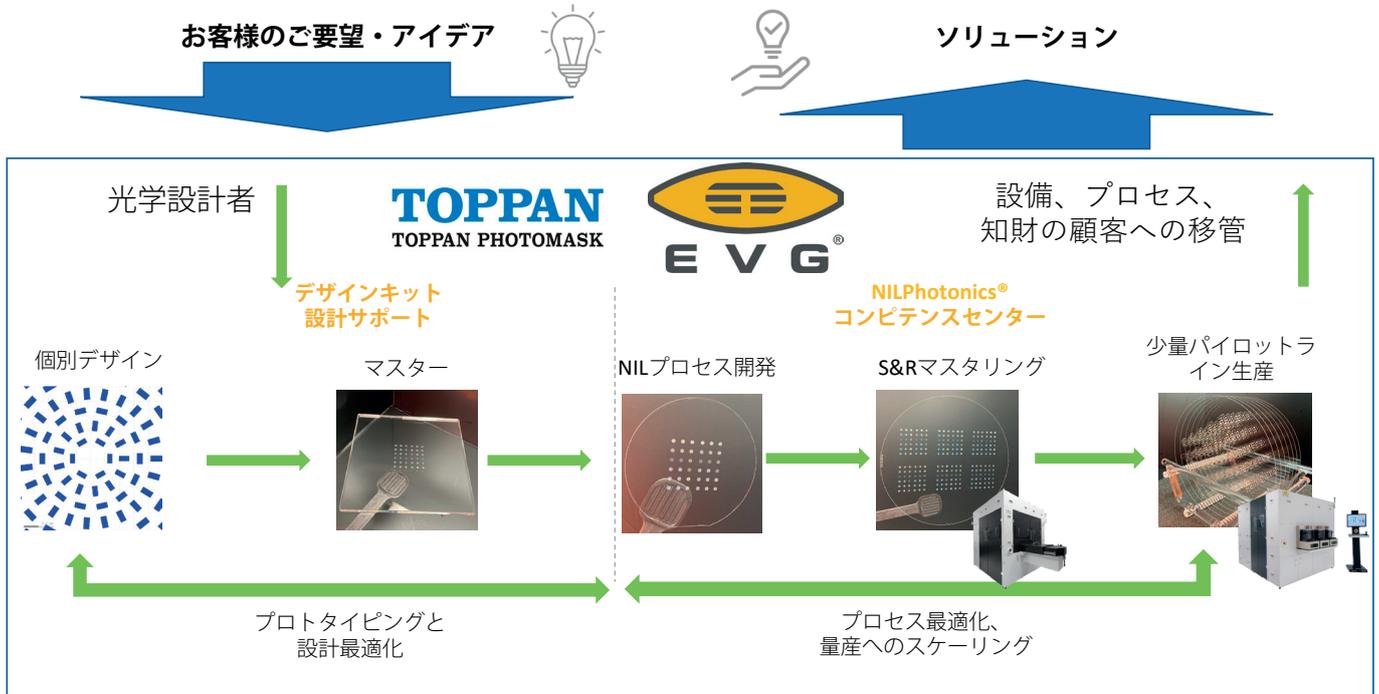


図 8: 「これらの機能にアクセスするには?」の概略図

イノベーターは、トッパンのプロセス・デザイン・キット (PDK) を利用し、新製品を設計することができます。設計図はその後、確立されたデータパスを使用してトッパンに転送されます。次に、自動データ処理プロセスにより、リソグラフィ・システムにデータが展開され、製品グレードのマスターが生成されます。最適に制御された再現性のあるプロセスを保证するために、マスターは半導体標準を使用して製造されます。これらのプロセスは半導体業界の標準に準拠し、優れた制御性により安定性、適切性、そして低欠陥レベルが証明されています。

マスターはその後、EVG NILPhotonics® コンピテンスセンターで使用され、製品の大量生産 (HVM) に向けたプロセス最適化が開始されます。EVG本社の1,300平方メートルのクリーンルームエリアにあるNILPhotonics® コンピテンスセンターでは、NILプロセス開発、S&Rマスタリングサービス、プロセスの最適化、そして「パイロットライン」製造段階までを含むプロトタイプングを提供することで、お客様のアイデア実現を支援します。その後、プロセスとNIL専用装置はお客様に移管されます。これにより、開発のあらゆる面において最高レベルの知的財産保護が保証されます。このコンピテンスセンターは、装置、専用計測機器、材料、そしてトッパン製マスターを含む完全なNILサプライチェーンを組み込んだ技術的専門知識へのアクセスなど、NILに必要なすべてをカバーしています。このオープンアクセス・イノベーション・インキュベーターは、お客様が革新的なフォトリソグラフィデバイスやアプリケーションの開発サイクルと市場投入時間を短縮できるようサポートしています。

まとめと結論

精密マスターとそれに続くナノインプリント・リソグラフィを使用したS&Rマスタリング、さらにウェーハレベルでの生産によって、量産ラインの構築が可能であることをトッパンとEVGは共同で示しました。1つのダイマスターから最終インプリントに至るまで、すべての工程が適切に管理され、高いパターン忠実度を得ることができます。これにより、メタレンズのような複雑なデバイスの製造を大量生産までスケールアップすることができます。

今回のコラボレーションは、両社の持つ技術の相乗効果によって、NILがフォトリソ業界におけるHVM技術の主流として、採用されることを、さらに促進することが目的です。特に、高性能のメタレンズやその他の複雑な光学構造の製造需要に応えられる装置とプロセスの準備が整ったことを示しています。