

反射防止メタレンズの開発とその光接続への応用

早稲田大学 総合研究機構 グローバル科学知融合研究所

中川 鉄馬

1. はじめに

通信機器の多様化や、Internet of Things などの通信ネットワークを経由したサービスの増大、また、人工知能 (AI) の急速な普及によって、ネットワーク内で IT 機器の処理すべきデータ量や消費電力が飛躍的に増大している。とくに、2020 年以降の新型コロナウイルス感染症の感染拡大や、さらに 2022 年以降の生成 AI の急速な普及を背景として、情報通信技術の果たす役割は大きくなっている。総務省発行の令和 5 年版情報通信白書によると、世界のデータ通信量は現在と比べ 2030 年には 30 倍以上、2050 年には 4000 倍に達するという予測もある [1-2]。さらなる大容量かつ低消費電力な情報通信に対するニーズが高まっている中で、光回路を小型化・集積化したチップの実現と、ボード・パッケージ・チップ等、全てのスケールでの各光機能部間の光接続、いわゆるオールフォトリック・ネットワークの実現が、その実現のための課題である。本研究で開発するメタレンズは、一般的なメタレンズの特徴である小型化のみならず、ナノピラーを構成する誘電体の積層構造化による低損失化が可能であることから、各光機能部間の光接続を担うデバイスとして非常に大きな強みとなる。

1 枚の平面的な基板上に形成したナノオーダーの微細構造 (ナノピラー) により光散乱や位相を精密に制御するという従来とは全く異なる原理により、レンズ・波長板・偏光素子などといった光学素子機能を実現する「メタサーフェス材料」は、超薄型で軽量の光学デバイスとして多くの応用が期待されている [3]。とくに、メタサーフェス材料は、半導体微細加工技術により大量生産可能であることから、ホログラフィックディスプレイ・光学センサ・AR/VR デバイスなど、次世代の光学デバイスへの応用が広く期待されている。また今後の光通信システムで重要となる光電子融合集積分野でも、超小型化・低消費電力化の実現技術としての期待も大きい [4-6]。しかし、従来のメタサーフェス材料は、メタサーフェス材料表面での反射によって光の損失が発生し、メタサーフェス材料の透過率特性が低下してしまうという課題がある。とくに光通信応用においては、反射は単に透過率低下にとどまらず、戻り光発生源となり通信品質低下の要因となるので厳格な抑制が求められる。

これまで、メタサーフェス材料の光学性能を向上させるために、材料設計やナノ構造の形状最適化、特定波長に対する透過・反射特性の制御を中心とした研究が進められてきた。しかし、メタサーフェス材料表面への反射防止膜の形成により光の損失の抑制を系統的に試みた研究はない。本研究では、AR コーティングによる反射防止膜のように、多層薄膜の干渉効果による低損失化を達成した光接続用メタレンズを実証する。

本研究の独自性は、多層薄膜の干渉効果によるナノピラー及び反射防止膜への影響を理論的かつ実験的に解明する点にある。とくに、ナノピラーによる表面プラズモン共鳴、光のモード間のカップリングや光の局在効果に着目することにより、メタレンズの透過率特性を最大化する学理を追求する。

2. 研究の方法及び内容

本研究では、光接続用メタレンズを有限差分時間領域 (FDTD) 法もしくは厳密波結合解析 (RCWA) 法によるシミュレーションにより設計する。本研究では、我々が所有している誘電体薄膜の高い成膜技術を活かして、誘電体及びそれらの積層構造をナノピラーとして用いる。可能な限り高い透過率が得られ、十分な位相変化が得られるようなナノ構造のパターン (材料、形状、寸法、厚さ、積層構造) [ライブラリ] を構築する。その構築したライブラリのナノピラーを周期的に集団配置することにより、光の進行方向、ビーム径・焦点距離、偏光を制御する。メタレンズの作製には、電子線描画装置、成膜装置、エッチング装置などの半導体微細加工技術が必要であるが、学内のナノテクノロジー研究センターや物質材料研究機構の微細加工オープンファシリティに設置されている共通機器を有効活用する。

メタレンズ表面における反射は、光損失や透過率特性低下の主要因であり、その抑制は不可欠である。本研究では、ナノピラー及び反射防止膜、それぞれによる光散乱・光位相制御を定量的に評価することにより、多層薄膜の干渉効果による影響を評価する。とくに、ナノピラーによる表面プラズモン共鳴、光のモード間のカップリングや光の局在効果に着目する。これらの検討により、反射防止膜の材料、屈折率特性、厚さの最適化を行い、メタレンズの透過率特性を最大化する。

3. 研究成果

(1) メタレンズを作製するための半導体微細加工技術の構築

本研究では、物質・材料研究機構 (NIMS) に設置された電子線 (EB) 描画装置を用い、 α -Si/ Al_2O_3 /石英基板上にレジストのナノパターンを形成した。レジスト塗布条件 (スピンコート回転数、ベイク温度・時間)、EB 描画条件 (電流値、露光量)、ならびに現像条件を最適化することで、作製するメタレンズのナノピラーと同等サイズのナノパターン形成に成功した。また、 α -Si ナノピラーを形成するため、深堀り反応性イオンエッチング (Bosch プロセス) の条件検討を実施した。エッチングモード及びパッシベーションモードにおけるガス流量・圧力、RF パワー、処理時間、サイクル数を最適化することで、規則的に配置された高アスペクト比 α -Si ナノピラーの形成に成功した (図 1)。

本研究の技術的な要点は、AR コーティングによる反射防止と同様に、多層薄膜の干渉効果を利用した低損失化を達成する点にある。この構造により、ナノピラー周囲の有効屈折率分布の精密制御に加え、散乱損失および界面反射の低減が期待される。

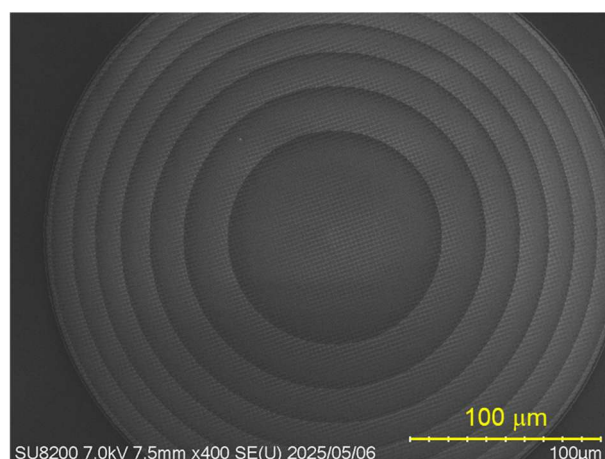


図 1. 作製したメタレンズの SEM 像

(2) メタレンズの設計

メタレンズの設計は、(i) メタ原子の設計 (ユニットセルライブラリの構築) 及び (ii) フルレンズの設計 (ピラー配置の決定) から構成される。とくに、メタ原子が高透過率を示すか、また、ユニットセルライブラリが位相の一周期 ($0-2\pi$) を連続的に再現できるかが重要である。本研究では、前述の特徴的な構造を導入することで、高い透過率を実現できるかを、有限差分時間領域 (FDTD) 法により検討した。その結果、前述の特徴的な構造を導入することで、透過率が向上することが明らかとなった。これは、空気クラッド構造と比較して屈折率不連続が緩和され、界面反射及び散乱損失が低減されたためと考えられる。また、 0 から 2π までの位相変化量についても、いずれのユニットセルにおいてもカバー可能であることが明らかとなった。すなわち、高透過率と広い位相制御範囲を両立したユニットセルライブラリの構築に成功した。

さらに、フルレンズ解析においても、焦点における光強度分布が、向上する結果が得られている (図 2)。以上より、多層薄膜の干渉効果を活用した反射抑制及び透過率向上による低損失化を達成する上で、大きな強みとなることを理論的に実証した。

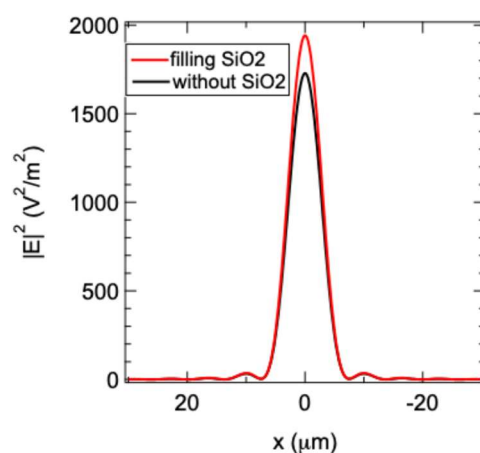


図 2. 設計したメタレンズの焦点における光強度分布

4. まとめ

本研究では、さらなる大容量かつ低消費電力な情報通信の実現に向け、各光機能部間の光接続を担う低損失メタレンズの開発を行った。多層薄膜の干渉効果による低損失化を目指した。電子線描画条件、現像条件及び深掘り反応性イオンエッチング条件を最適化し、規則的に配置された高アスペクト比 α -Si ナノピラーの形成に成功した。有限差分時間領域法による検討の結果、特徴的な構造を導入することで、透過率が向上することが明らかとなった。さらに、高透過率と 0 から 2π までの広い位相制御範囲を両立したユニットセルライブラリの構築に成功した。フルレンズ解析においても焦点における光強度分布が向上し、反射抑制及び透過率向上による低損失化に大きな強みとなることを理論的に実証した。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 総務省『令和 5 年版 情報通信白書』
- 2) 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター『情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1)』
- 3) S. Kar, “Metamaterials and Metasurfaces Basic and trends”, IOP Publishing (2023)
- 4) H. Ye et al., Optics Express, 29, 27251 (2021)
- 5) S. Majumder et al., Optical and Quantum Electronics, 56, 1022 (2024)
- 6) J. Li et al., Advanced Optical Materials, 12, 2401712 (2024)