

全偏光に焦点を合わせる 広帯域色収差補正レンズ

光メタサーフェスレンズは、さまざまな形状のナノ構造サブ波長アレイでできており、真のフラットレンズ形成が可能である。これらはますます、屈折レンズ素子の実際の置き換えになり、アプリケーションによっては、屈折レンズ系全体の置き換えにさえなりそうである。とはいえ、この種のメタレンズ設計には克服すべき障害がいくつかある。1つは狭帯域パフォーマンスを超えることの難しさ、もう1つは両偏光(つまり非偏光の光)に焦点を合わせるメタレンズの設計が難しいことである。一般用途のメタレンズは、これらの特性の両方を持つ必要がある。

研究者は、円柱のような対称的ナノ構造が、偏光無依存メタレンズを開発するための重要な構成要素であると考えていた。このほど米ハーバード大工学・応用科学スクール(SEAS)の研究者が、偏光無依存メタレンズを開発した。これは、収差なしで可視光全体に光を無彩色に集光できる非対称ナノフィンで構成されている⁽¹⁾。このフラットレンズは、VR/ARヘッドセットから顕微鏡、リソグラフィ、センサ、ディスプレイまであらゆるものに使用できる。

「このレンズを偏光無依存にすることによって、我々は、メタレンズの効率を前の反復から2倍にした」とSEAS研究助手、ウェイ・ティン・チェン氏(Wei Ting Chen)は言う。「これは、可視光にフォーカスした無彩色と偏光無依存の両方を実証する初めての論文である」と研究リーダー、フェデリコ・カパッソ氏(Federico Capasso)は話している。SEASの同氏のグルー

プは、メタレンズでこれまで多くの進歩を達成している。ハンドヘルド分光計向けのメタ光学系、広角度、高効率多色メタレンズ、オンチップのメタサーフェス偏光計が含まれる。

以前の研究で、カパッソ氏、チェン氏とそのチームは二酸化チタンナノフィンアレイが光波長を等しく集光し、色収差を除去することを実証した。しかし、そのレンズは円偏光の光しか集光できなかった。「つまり、我々は本質的に入射光の半分、右偏光を持たない光を捨てていた」とSEAS院生、アレクサンダー・ツ氏(Alexander Zhu)は話している。

460から700nmの回折限界

この最新設計で研究者は、ナノフィンのレイアウトを変更し、各ピラーをその隣のピラーに対して平行または垂直のいずれかになるように配置した。「この新設計で、メタレンズの幾何学的形状パラメータを調整する自由度が大きくなり、これによって全可視域にわたり無彩色に集光できる」とチェン氏は言う。

実験レンズは、26.4mm径、0.2NAであり、これは460nmから700nm(青、赤、緑およびその間の色を網羅する)の可視波長域で回折限界イメージング品質を持つ。

そのメタレンズの設計は、有限差分時間領域法(FDTD)ソルバを使用して行われた。各要素の位相、群遅延分散を得るためである。また、「粒子群」法によって最適化された。これによって位相、群遅延および群遅延分差(図1)

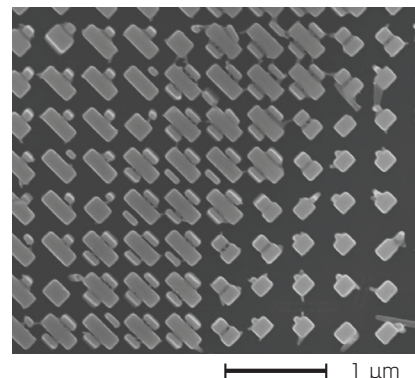


図1 これらのサブ波長異方性ナノ構造はメタレンズ表面に配置されており、偏光に関係なく光を集光でき、レンズの効率を2倍にする。二酸化チタンナノフィンは、「粒子群」アルゴリズムを使って、形状最適化された。(提供:ハーバード大SEASカパッソラボ)

の適切なシフトが得られた。レンズそのものは、電子ビームリソグラフィを使い、二酸化チタン(TiO₂)膜から作製された。異方性ナノフィン設計により、研究者は、周波数に関して、正確かつ同時に位相とその高次導関数(群遅延と群遅延分散)を最適化できた。結果は530nmで92%の回折効率、個々の偏光に対して4%程度しか変化しない集光効率のデバイスである。

26.4mm径のレンズは、ナノ構造素子の達成できる群遅延によって制約される。レンズで使用される高さ600nmのナノフィンで約5fsである。より大きな径のレンズを作るには、もっと高いナノフィン、双曲線型メタマテリアル、あるいはハイブリッド回折-屈折レンズ設計が必要になる。「次は、効率を最大化し、もっと大きな色収差補正レンズをつくり、それらを広範なアプリケーション向けに日常生活に導入することが目標である」とカパッソ氏は話している。

(John Wallace)

参考文献

- (1) W. T. Chen et al., Nat. Commun.(2019); <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08305-y>.