

ORIGINAL ARTICLE

アクティブプラズモニックメタサーフェスを用いたビームスイッチングと遠近両用ズームレンズ

Xinghui Yin^{1,2}, Tobias Steinle¹, Lingling Huang³, Thomas Taubner⁴, Matthias Wuttig⁴, Thomas Zentgraf⁵
and Harald Giessen¹

適応可能な特性を示すコンパクトなナノフォトニック素子は、補償光学や空間光変調器などの強力な光学技術の小型化に不可欠なコンポーネントである。大型のものは機械的な作動に頼るのが一般的であるが、ミクロなスケールでは固有のスペース制限のために望ましくない場合がある。ここでは、共振プラズモニック・メタサーフェスと相変化材料Ge₃Sb₂Te₆を組み合わせた、高集積アクティブ光学部品の新しい設計コンセプトを提案する。特に、ビームスイッチングと遠近両用レンズを実証し、同じ設計原理に従うプラズモニックメタサーフェスを採用した多数の能動光学素子への道を開く。

Light: Science & Applications (2017) 6, e17016; doi:10.1038/lsa.2017.16; published online 28 July 2017

Keywords: active; beam-forming; metasurfaces; phase-change material; plasmonics

緒言

Form follows function (形は機能に従う)¹—何世代にもわたってモダニズム建築家が守ってきたこの原則は、レンズ設計に関しては、単なるガイドラインではなく、むしろスネルの屈折の法則²によって指示された揺るぎない最大公約数である³。波面を作るために使用される材料界面の曲率は、光学素子が果たすべき意図された機能に密接に従う。能動光学素子は、様々な状況下で満たさなければならない要求の変化に応じて、それ自体の形状を変化させることによって、自然にその任務を遂行する。例えば、人間の目の水晶体は、遠くの物体を見るときから近くの物体を見るようになるとき、その曲率を大きくする。同様に、天文学で使用される変形可能なミラーは、大気の擾乱から生じる波面の歪みを補正するためにその表面を調整する。しかし、メタサーフェス、つまりサブ波長厚の人工物、さらに一般化されたスネルの法則^{4,5}の登場により、形は機能から切り離された。メタサーフェスレンズ^{6–12}は、完全に平坦でありながら、急激な位相ジャンプによって空間的に変化する位相プロファイルを与えることができ、その結果、透過光波の波面を形成することができる。したがって、アクティブなメタサーフェスを利用した光学素子は、幾何学的に静的なアプローチとはまったく異なるアプローチで様々な機能を実現することができ、これがメタサーフェス空間の光学部品の主な利点である。^{13,14}

金属中の自由電子と光の相互作用を研究するプラズモニクスは、メタサーフェスと密接に関連する研究分野であり、機械的な変形に頼らないアクティブな設計をすでに実現している。さらに、グラフェン^{15–18}、半

導体中の自由キャリアの注入^{19–23}、VO₂^{24–26}、ガリウム^{27,28}、イットリウム-水素化合物²⁹マグネシウム³⁰、相変化材料GeSbTe (GST)^{31–34}などの相転移材料が、アクティブ・プラズモニクスの実現に成功している。特にGSTは、外部刺激なしに機能を維持するコンパクトな光学部品³⁵のための再調節可能な振幅マスクの実証にも単独で使用されている。これは、相変化材料が室温で準安定な相を持つために可能なことである。

材料と方法

メタサーフェス・ファブリケーション

バックグランド圧力 2×10^{-6} mbar、Ar流20 sccmでDCマグネトロンスパッタ成膜し、ZnS:SiO₂の保護層15 nmをスパッタした50 nmのGST-326膜の上に作製したメタサーフェスナノ構造を用いて、ビームスイッチングと遠近両用レンズの概念を実証した。

その後、1層目は100 nm 3.5% 200 K、2層目は100 nm 1.5% 950 Kのポリメチルメタクリレート (PMMA) 二層レジストを用いた電子線リソグラフィーを用いて金ナノ構造メタサーフェスを作製した。各層の後、レジストを120 °Cで2分間ベークした。3:1のMIBK:イソプロピルアルコールで現像した後、2 nmのクロムと40 nmの金を熱蒸発させ、リフトオフを行った。

シミュレーション

シミュレーションは、Lumerical社のfinite-difference time-domain Solutionsを用い、ビームスイッチングと遠近両用レンズのメタサーフェスにそれぞれ周期境界条件と完全整合層を設定した。

¹4th Physics Institute and Research Center SCoPE, University of Stuttgart, 70550 Stuttgart, Germany; ²Max-Planck-Institute for Solid State Research, Heisenbergstrasse 1, 70569 Stuttgart, Germany; ³Beijing Institute of Technology, No. 5 South Zhongguancun Street, Beijing 100081, China; ⁴I. Institute of Physics (IA), RWTH Aachen University, 52056 Aachen, Germany and ⁵Department of Physics, University of Paderborn, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, Germany
Correspondence: X Yin, Email: x.yin@pi4.uni-stuttgart.de

Received 13 September 2016; revised 13 February 2017; accepted 14 February 2017; accepted article preview online 6 June 2017

メタサーフェスは、屈折率1.47のCaF₂基板上に配置し、その上にa-GSTまたはc-GSTをそれぞれ50nm(屈折率データは文献32より)、屈折率2のZnS:SiO₂を15nm配置した。3.1 μmを中心とするRCP平面波励起を用い、メタサーフェス背後のLCP光のfield強度を評価した。

ビームスイッチングコンセプトのメタサーフェスを測定するための実験セットアップ

1033nmのポンプ波長と3100nmのアイドラー波長で動作する自作マスターオシレーターパラメトリックアンプ(MOPA)36を用いて、ビームステアリング用メタサーフェスの光学特性を測定した。コリメートされたビームは直線偏光で、メタサーフェスを通過して焦電アレカメラ(Pyrocam III, Ophir Photonics)に入射する前に1/4波長板を通過した(補足図S1参照)。

遠近両用レンズコンセプトのメタサーフェスを測定するための実験セットアップ

同じ自作MOPA光源を3100nmに設定して、バリフォーカルレンズの特性を評価した。右回りの円偏光を発生させるため、メタサーフェスの手前で1/4波長板をビーム経路に導入した。試料を通過した後、光は20倍の対物レンズで集められ、左回りの円偏光だけを透過するように設定された2つ目の1/4波長板と直線偏光子に送られた。その後、得られた二次元(2D)強度分布を焦電カメラ(Pyrocam III, Ophir Photonics)で撮像した。試料は、マイクロメートルのスクリューゲージを備えた直線移動ステージに設置し、100 μmごとに異なるz平面を撮像できるようにした。(補足図S2参照)。

結果と考察

ここでは、メタサーフェスと低損失相変化材料(PCM) Ge₃Sb₂Te₆(GST-326)^{32,37}を組み合わせたアクティブプラズモニックナノフォトニックコンポーネントの設計のための新しいアプローチを紹介する。特に、約3.1 μm(補足図S4参照)におけるアモルファス相(nc=3.5 + 0.001i)と結晶相(nc=6.5 + 0.06i)の間の光誘電率の大きなコントラストを利用した。概念実証デモでは、2つの異なるプラズモニックアンテナ素子AおよびBが、GST層上の1つの光相互作用領域内で空間的にずらされながら、例えばビームを反対方向に屈折させるなど、異なる機能を提供する(図1a)。相変化材料の状態によって、ある動作波長で入射光と強く相互作用するプラズモニック・アンテナのセットを選択することができる。これは、A型とB型アンテナのそれぞれのプラズモン共鳴波長が、アモルファスまたは結晶PCM状態での動作波長と一致するように、適切な長さを選択することで達成される(図1b)。したがって、PCMを切り替えるとメタサーフェス要素のサブセットが選択的に「活性化」され、これは周波数選択的サーフェスに関する初期の研究を彷彿とさせる^{38,39}。異なるデザインを1つのレイアウトにずらすというコンセプトは、個々のアンテナ素子の幾何学的フットプリントよりもはるかに大きい共振時の消光断面積を示すという、固有の局所表面プラズモン共振特性に決定的に依存している。これにより、光の相互作用の観点から効果的に連続的に覆われた表面を保ちながら、エレメントの間隔を比較的離すことができる。千鳥配置のメタサーフェスを設計する際の唯一の制限要因は、望ましくない損失チャネルを導入する可能性のある、ある周期性を持つプラズモニックアンテナ素子の周期的配置から生じるレイリー異常などの伝搬表面モードを回避することにある。

まず、活性PCM層の位相に応じて入射ビームを反対方向に屈折させるプラズモニック・ビームスイッチング・メタサーフェスを用いたバイファンクショナル・アクティブプラズモニックデバイスの構築原理を示す。ナノロッドアンテナの相対回転角が、入射円偏光(CPL)の相互変換された部分によって拾われる位相に直接関係するメタ表面での急激な位相ジャンプΦを設計するために、分散なしの幾何学的位相アプローチ40を利用する。アンテナによって散乱される相互変換された光電場は、入射電場によって誘起されるダイポールモーメントpから生じ、このダイポールは、x-y平面においてx軸と角度φをなすダイポールに次のように衝突する。

$$P_{L(R)} = (a_1 e_{L(R)} \pm a_2 e^{\pm i2\phi} e_{R(L)}),$$

ここで、a₁: a₂は、それぞれ共偏光と交差偏光の振幅であり、添え字のRとLは、それぞれ右回りと左回りの円偏光を示し、e_{L(R)}は、左回りと右回りの円偏光の単位ベクトルである。指数の符号は入射/透過の組み合わせに依存し、LCP/RCPの場合は正、RCP/RCPの場合は負となる。

LCP/RCPでは正、RCP/LCPでは負となる。このように、電気双極子、すなわちプラズモニック・ナノロッド・アンテナをx-y平面内で0からπ⁴⁰まで回転させることにより、0から2πの範囲で連続的に完全な急激な位相ジャンプΦ=2φを実現することができる。したがって、m個のナノロッドを超周期Λにわたって等間隔に配置し、隣接する素子間の相対回転角をπ/mにすると、一定の位相勾配dφ/dxが得られる。変換された円偏光に対する一般化されたスネルの法則は次のようになる⁴。

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi dx} d\phi = \pm \frac{\lambda_0}{\pi dx} d\phi = \pm \frac{\lambda_0}{\Lambda}$$

この原理を用いて、長さIA = 600 nm、IB = 370 nm、厚さtA = tB = 40 nm、幅wA = wB = 50 nmのm = 15個のアンテナA、Bの2列からなるビームスイッチング活性プラズモニックメタサーフェスのユニットセルを構成する。アンテナは金でできており、x方向に等間隔で配置され、周期性はp = 900 nm、A列とB列の間隔はd = 550 nmである(図2a)。この結果、a-GST層上のアンテナAとc-GST層上のアンテナBでは、λ₀ = 3.2 μmでプラズモン共鳴が生じる。超周期Λは13.5 μmであり、入射光のヘリシティに応じてθ_t = ±13.28°の屈折角が得られる。

上段のナノロッドは左から右へ時計回りに回転しているのに対し、下段のナノロッドは反時計回りに回転しており、入射する円偏光のヘリシティが同じであれば、屈折角は逆になる。X方向とY方向の周期境界条件を持つユニットセルに対して、フルフィールドの時間領域差分法を用いたシミュレーションを行った。

x方向とy方向に周期境界条件を設定した。メタサーフェスはz = 0に位置し、上部からRCP光を垂直入射で照射した。その結果、x-z平面を切断した位相プロファイルは、相互変換光(LCP)のa-GSTとc-GSTについて、反対の角度への屈折を示している(図2b)。規格化された透過率スペクトルから、a-GSTの場合、アンテナAは3.2 μm付近に共振しているのに対し、c-GSTの場合、アンテナBの共振はこのスペクトル位置にシフトしていることがわかる。透過率の値が1を超えるのは、グレーティングモードの励起によるもので、正規化に使用した背景領域に対して、同じ相互作用領域により多くの光が漏れることになる。このように、相変化材料の状態は、アンテナセットAとBのどちらが入射光と相互作用するかを選択する。これは、光の入射状態がメタサーフェスのどの部分と相互作用するかを選択する以前のアプローチとは根本的に異なる⁴¹⁻⁴³。

プラズモニック金ナノロッドを作製するために、 $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ の領域に電子ビームリソグラフィーを用いて設計を行った。基板には、GST-326を50 nmの厚さで形成したCaF₂を用い、

GSTと金の酸化と化学的分離を防ぐために、ZnS:SiO₂キャッピング層を15 nmの厚さで形成した。得られたメタ表面の走査型電子顕微鏡写真を図3aに示す。

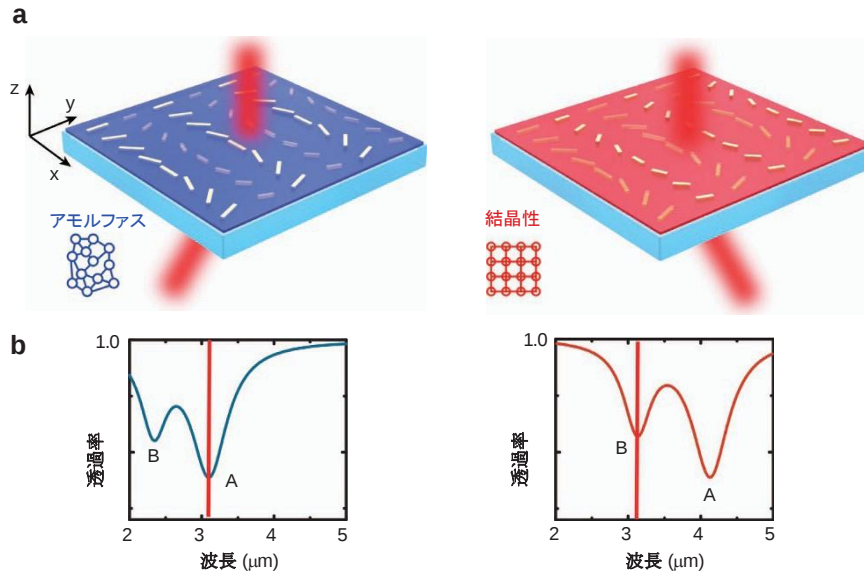


図 1 ビームスイッチング用アクティブプラズモニックメタサーフェス。アクティブなメタサーフェスは、ビームスイッチング用の幾何学的位相メタサーフェスの下にある厚さ50nmのGST-326層からなる。プラズモン共鳴の異なる2種類のナノアンテナAとBが交互に並んでいる。(a) 活性層がアモルファス相の場合、タイプAのロッドのみが波長 $3.1\ \mu\text{m}$ の入射光と相互作用し、ビームを偏向させる(左)。活性層が結晶相の場合、タイプBのロッドのみが入射光と相互作用し、相対的な配向によりビームを反対方向に偏向させる(右)。(b)アモルファス状態(左)と結晶状態(右)における活性メタサーフェスの透過率の模式図。

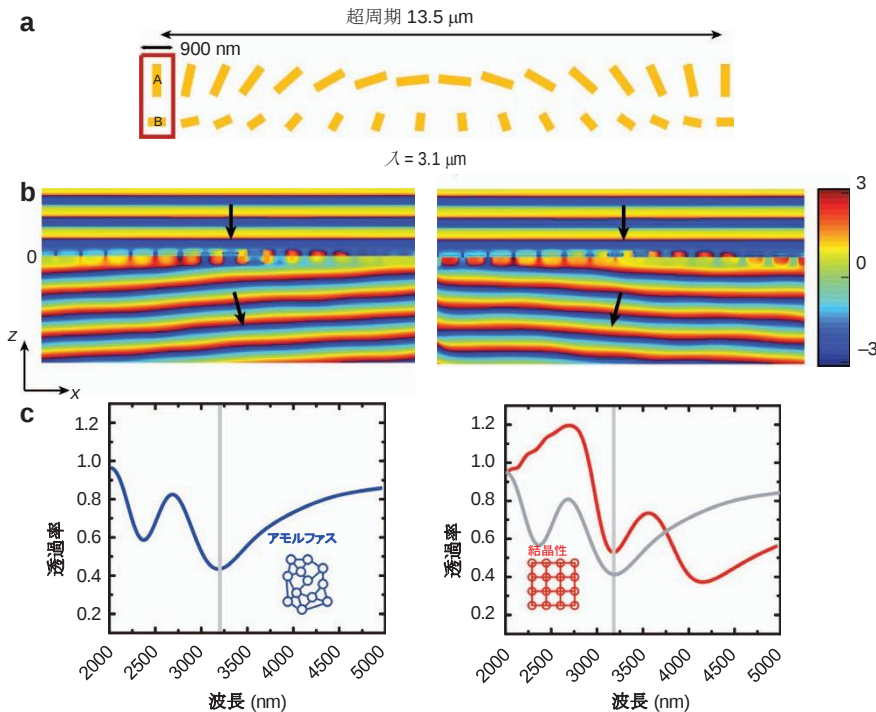


図 2. アクティブビームスイッチングメタサーフェスの動作原理。(a)基本構成ブロックは、サイズの異なる2列のナノアンテナ素子AとBからなる。アンテナAは、アモルファスGST基板に対してより長く、 $3.2\ \mu\text{m}$ で共振する。アンテナは、左から右に向かって連続する各アンテナが、前のアンテナに対して時計回りに 12° 回転するように配置されている。アンテナBは、結晶GST基板に対して短く、 $3.2\ \mu\text{m}$ で共振する。反時計回りに回転して配置されている。(b)RCP光が入射するフルフィールドシミュレーションから得られた相互変換散乱光束(LCP)の位相プロット。GST基板の状態によって、ビームは異なる方向に偏向する。(c) a-GSTとc-GSTのビーム切り替えメタサーフェスのシミュレーション透過率。

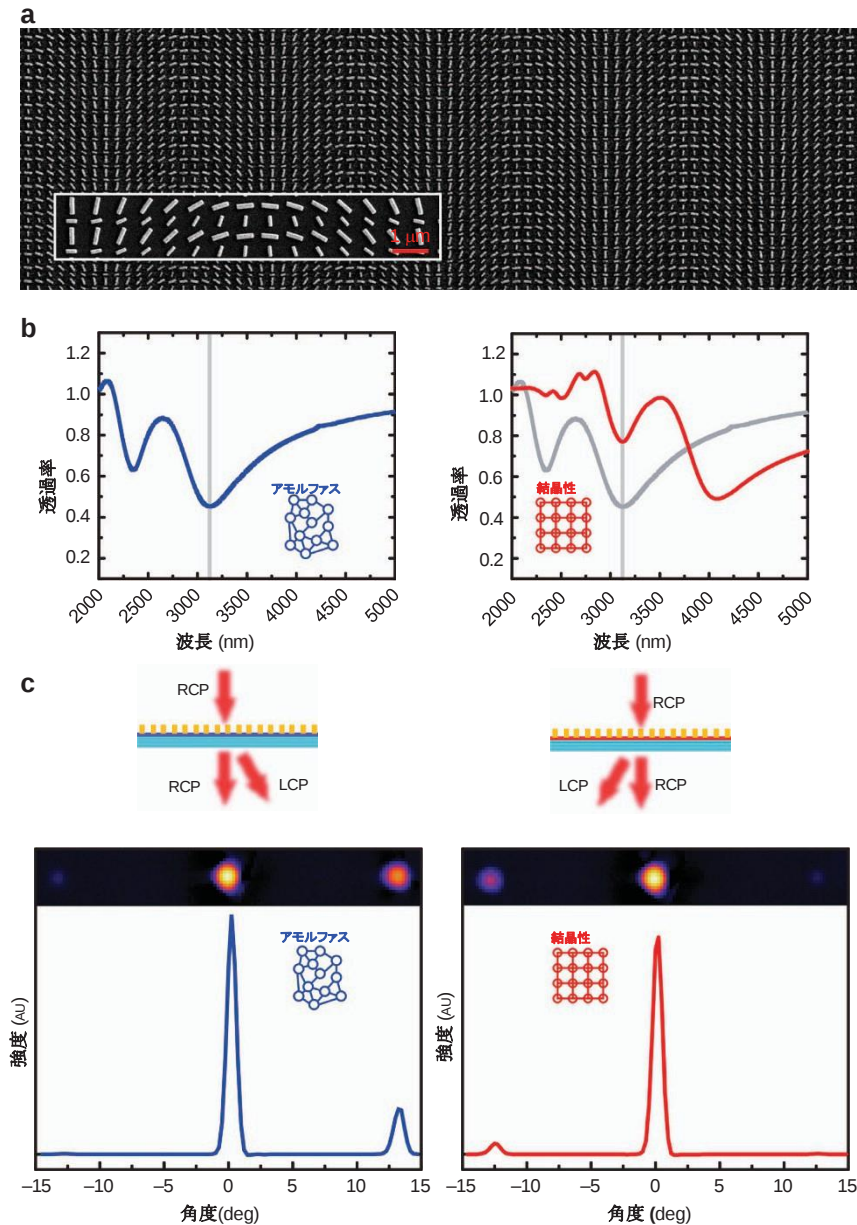


図3 ビームスイッチングメタサーフェスの実験結果。(a) 電子ビームリソグラフィにより作製したビームスイッチングメタサーフェスのSEM顕微鏡写真。(b) 作製したメタサーフェスのアモルファス状態(左)と結晶状態(右)の透過率。(c)アモルファス状態(左)と結晶状態(右)の活性メタサーフェスが透過したビームの赤外線カメラ画像と強度プロット(同じ任意単位スケール)。設計通り、相変化材料に結晶化を誘導した後、偏向ビームはメインビームの反対側に切り替わる

アモルファス相と結晶相の両方における光学特性と、提案した設計の機械的・化学的安定性を検証するため、作製したサンプルに1回の相変化を起こさせた。GSTは蒸着状態ではアモルファスであり、相転移を起こす。

結晶化温度 $T_{\text{cryst}} = 160^\circ\text{C}$ 以上に加熱すると結晶状態に相転移する。そこで、試料を 180°C で2分間加熱するホットプレート誘起結晶化を採用した。

一方、アモルファス化は、GSTの温度を融解温度 $T_{\text{melt}} = 640^\circ\text{C}$ 以上に上昇させ、熔融急冷することで達成される。これには、選択的かつ迅速にGSTのみを加熱し、その熱を環境、特に基板に放散させる^{44,45}光または電気パルスが必要である。そのため、ホットプレート誘導加熱法を用いても、異なる相を循環させることはできない。

我々は、顕微鏡に連結したBruker Vertex 80を用いて、加熱前と加熱後の同じ試料のフーリエ変換赤外 (FTIR) 分光測定を行った。設計通り、a-GSTでは長いナノロッドAのプラズモン共鳴は $3.15\mu\text{m}$ にあるのに対し、短いナノロッドBは $2.28\mu\text{m}$ に共鳴を示した。結晶状態では、ナノロッドセットBに関連するプラズモン共鳴は $3.15\mu\text{m}$ にシフトし、これはa-GSTの場合のアンテナセットAの共鳴位置と見事に一致する。同時に、アンテナセットAのプラズモン共鳴は、 $4.1\mu\text{m}$ へと関心領域外にシフトしている。

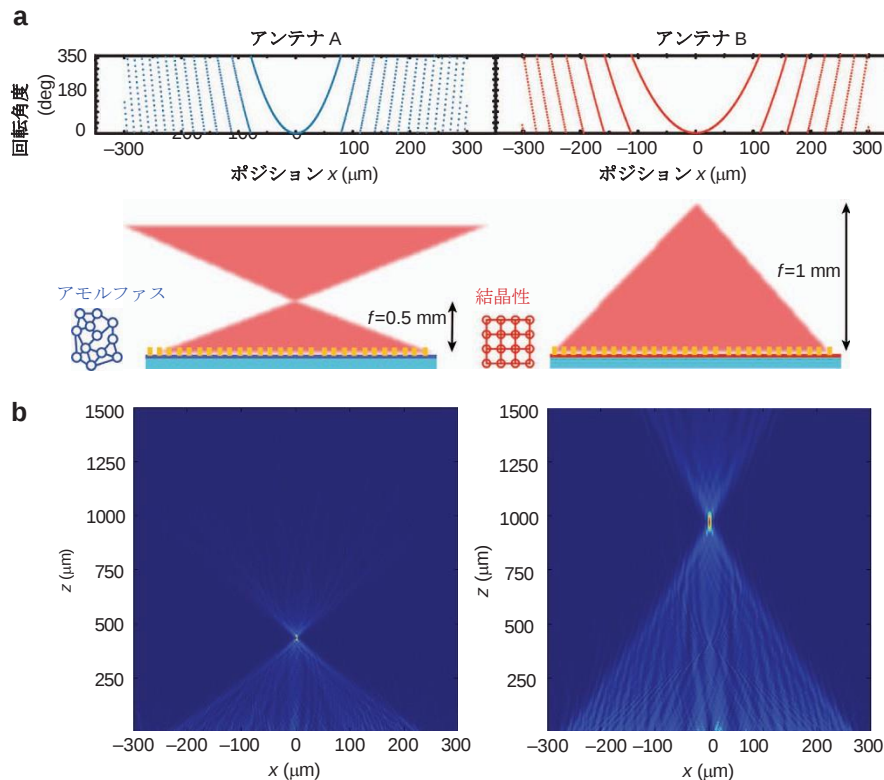


図4 シリンドリカル遠近両用レンズの動作原理。ビームスイッチングメタサーフェスと同様に、アンテナAとBはGST基板上にライン状に交互に配置され、入射光と相互作用するアンテナのタイプに応じて焦点が変化するシリンドリカルレンズを得る。(a) アンテナタイプA(左)とB(右)のx位置に対する回転角度。これらの分布は、アモルファスGSTでは $z = 0.5\text{mm}$ に、結晶GSTでは $z = 1\text{mm}$ に焦点をもたらす。(b) アモルファス(左)と結晶(右)の場合に生じる電界強度の全電界シミュレーション。設計通り、焦点はアモルファスの場合は $z = 0.5\text{mm}$ 、結晶の場合は $z = 1\text{mm}$ にある。

アモルファス状態と結晶状態の両方で、「方法」のセクションで詳述したようにサンプルの特性を評価した。RCP照明の結果を図3cに示す。GSTがアモルファス状態の場合、アンテナのスネルの法則に従う非変換RCP部分の右側に屈折させるため、伝搬方向は変化しない。測定された偏角は 13.23° であり、理論値 13.28° とよく一致している。

$\alpha = \sin^{-1}(\lambda_0/\Lambda)$ で求められる。結晶GSTの場合、入射ビームはアンテナセットBと相互作用する。

従って、変換された部分は反対方向に屈折する。c-GSTの場合の異常屈折ビームの相対強度は、図3bに見られるように、アンテナセットBのプラズモン共鳴の散乱が弱いいため、a-GSTの場合よりも低くなる。これは、アンテナセットBに使用される短いナノロッドのダイポール強度が弱いためであり、c-GSTの屈折率の高い実数部と虚数部によってさらに減少する。このプラズモン共鳴振幅の減少を部分的に打ち消すには、アンテナセットBに太くて長いナノロッドを使うか、アンテナセットAの各1列に対して2列を使うか、あるいはさらに低損失のPCMを開発すればよい。測定された相対効率率は、入射ビームに対する異常屈折ビームの強度比で与えられ、以前に報告された値40と同様、約5%であった。アンテナAは、c-GSTの場合、非常に弱い励起(0.5%の効率)で、元の位置にかすかなサイドローブが現れる。

第二の実例として、二重焦点円筒形プラズモニック準表面レンズのコンセプトを示す。

アンテナセットAとBのナノロッドに必要な空間位相プロファイルと対応する回転角(図4a)は、回折円筒レンズの公式^{10,46}を用いて $600\text{ }\mu\text{m}$ の面積にわたって計算される。

$$\varphi(x) = 0.5k_0(\sqrt{f^2 + x^2} - |f|)$$

ここで、 ϕ は回転角、 f は焦点距離、 k_0 は自由空間波動ベクトル、 x はナノロッドの関連する x 位置を示す。

特に、アンテナセットAでは焦点距離 $f_A = 0.5\text{mm}$ 、アンテナセットBでは焦点距離 $f_B = 1\text{mm}$ を使用する。

つまり、アモルファスGSTの焦点は 0.5mm にあり、結晶GSTの焦点は 1mm にある。入射偏光はRCPであり、メタレンズは収束レンズとして動作する¹⁰。周期性は x 方向に 900 nm 、 y 方向に 110 nm で、アンテナセットAとBの中心間距離は 550 nm である。

完全に整合した層を境界とし、 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ でRCP平面波を入射させた $650\text{ }\mu\text{m}$ のシミュレーション領域でフルフィールドシミュレーションを行い、我々の設計の性能を検証した(図4b)。変換された電界強度(LCP)のプロットから、選択した z 位置においてアモルファスおよび結晶の両方のケースで実際に集束が起こることが明らかになった。前回と同じ手順で設計を行い(「材料と方法」のセクション、図5bのSEM顕微鏡写真を参照)、MOPA光源を用いて波長 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ のサンプルを特性評価した。活性メタレンズの前に $1/4$ 波長板を使用し、直線偏光MOPA出力からRCPを生成し、その後、同一の $1/4$ 波長板と直線偏光板でフィルターし、変換されたLCP光を得る。

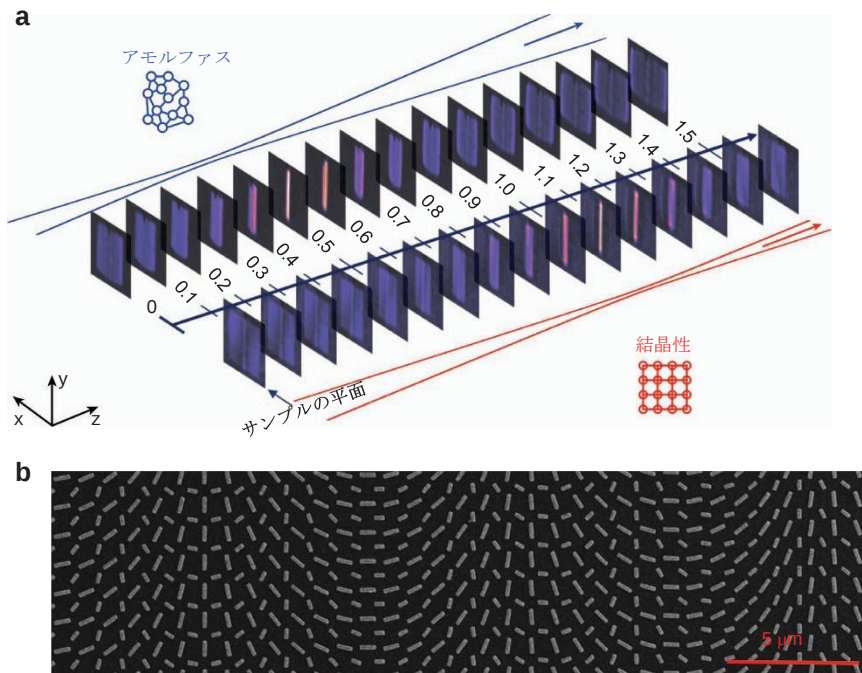


図5 シリンドリカル遠近両用レンズの実験結果。(a) メタサーフェスからの距離 z を変えて撮像したシリンドリカル遠近両用レンズのカメラ写真。シリンドリカルレンズの設計であるため、 x 方向のみに焦点が合っている。アモルファスの場合、 $z = 0.5\text{mm}$ で明るい線が現れるが、結晶の場合は同じ z の位置で広い拡散光を示す。 $z = 1\text{mm}$ では、明るい線の焦点が結晶の場合に現れるのに対し、アモルファスの場合は光のパッチしか観察できない。これは理論と非常によく一致している。(b) 作製した円筒形メタサーフェスレンズの一部のSEM顕微鏡写真。

倍率20倍の顕微鏡を用いて、異なる z = 一定平面を画像化し、二重焦点プラズモニックレンズからの異なる距離におけるビーム形状を明らかにした(詳細はサポート情報を参照)。試料面と $z = 0.5$ および 1mm の距離で得られた画像を図5aに示す。GSTがアモルファス状態の場合、前述と同様に、アンテナセットAのみが入射光と相互作用し、 $z = 0.5\text{mm}$ に焦点を形成する位相プロファイルが刻印される。設計通りに結晶状態への相変化を誘導した後、アンテナセットBがメタレンズの機能を決定する。これは、 $z = 1\text{mm}$ で可視化される焦点線として現れる。ビームスイッチングの場合と同様に、アンテナセットAはc-GSTの場合にも弱く相互作用し、 0.5mm で約0.5%の効率でかすかな焦点線が現れる。我々のデモンストレーションでは、アモルファスのケースで中程度の開口数($\text{NA} = 0.5$)を使用した。誘電体ナノアンテナを使用した幾何学的位相アプローチで $\text{NA} = 0.8$ の高開口数を達成できることが実証されている⁴⁷。達成可能なNAは、位相の空間サンプリングをどれだけ高密度に行うことができるかによって制限されるだけであり、これはナノフィンやプラズモンアンテナに匹敵する。

集光効率(集光強度を入射強度で割った値)は、誘電体メタサーフェスの集光効率に比べると比較的低い(結晶の場合は約10%、アモルファスの場合は5%)。しかし、ここで紹介するプラズモニック・アンテナは、誘電体環境に対して非常に敏感であるというユニークな利点がある。したがって、我々の設計コンセプトはプラズモニック・システムでのみ実現可能である。

結論

結論として、我々はアクティブな小型ナノフォトニックデバイスを設計するための新しいアプローチを提示し、プラズモニックビームスイッチングメタサーフェスと二焦点メタレンズの例において、光学特性、機械的・化学的安定性の点で実現可能であることを実験的に実証した。

提案された方法には、機械的な動きや再構成に頼ることなく、層状に高度に統合されるという利点がある。我々は、1つのサンプルにつき2つの機能性だけを織り交ぜることに限定したが、異なる共鳴を持つナノロッドのセットをさらに利用することも可能である。GST層は部分的にアモルファス状態から結晶状態に切り替えることができ(アモルファス状態への逆プロセスは、熔融急冷によって達成されるためシングルステップとなる)、それぞれの状態がそれ自体で準安定になるような⁴⁸異なるアンテナセットを選択する中間屈折率を生成することができる。アンテナセットの数が多ければ多いほど、アンテナセットあたりのカバーエリアは狭くなり、したがって個々の性能は弱くなる。しかし、機能性はビームの変換された部分にのみ付与されるため、相互作用せずにメタサーフェスを通る光を簡単に除去することができる。さらに、特定のPCMを選択することで、追加の設計パラメータを容易に利用できるように、ユニークな光学特性³⁷を持つPCMの全範囲が存在する。

1つのアクティブなメタサーフェスに類似の機能を組み合わせることに制限されることはない。1つのアクティブなメタサーフェスに全く異なる光学コンポーネントを簡単に「ミックス＆マッチ」させることができ、その結果、高度に統合された多目的ナノフォトニック・コンポーネントを作り出すことができる。さらに、我々の実証は一方向のホットプレート誘起相変化に依存しているが、GSTが超高速時間スケールで電気的・光学的に可逆的にスイッチングできることはよく知られている^{44,45,49}。われわれが提示した設計コンセプトの実用化には、理想的には、本研究で使用した連続層の代わりに、ダイシングしたGST基板を利用することになるだろう。これにより、ナノスケールの相変化材料を扱うデータストレージで知られる標準的な電気的スイッチング・セットアップを使用できるようになる。電気的スイッチングでは、さらにインジウム・スズ酸化物のクロスバー電極を実装すれば、GSTパッチの個別アドレス指定も可能になる。

全体として、今回紹介したアプローチは、ビームスイッチングとレンズを組み合わせた新しいスキャナーのようなオンデマンド・ナノフォトニック・コンポーネントから、収差補正やアクティブ・ホログラフィーのためのダイナミック・フェーズドアレイ光学系まで、多くの方向で探求できるエキサイティングな新しい設計原理を生み出す。

利益相反

著者らは利益相反がないことを宣言する。

謝辞

ERC Advanced Grant (COMPLEXPLAS), BMBF (13N9048 and 13N10146), Baden Württemberg Stiftung (Internationale Spitzenforschung II), DFG (SPP1391, FOR730 and GI 269/11-1), SFB 917 (Resistive Nanoswitch)による財政的支援に感謝する。XYとTSは、Carl-Zeiss-Stiftungによる財政的支援も受けた。可視化を支援いただいたNikolai Strohfeldt、光学セットアップを支援いただいたFlorian MörzとStefan Kedenburgに感謝する。DFGとシュトゥットガルト大学のオープンアクセス基金による支援に感謝する。

- 1 Sullivan LH. The tall office building artistically considered. *Lippincott's Magazine*. 1896; 403–409.
- 2 Born M, Wolf E. *Principles of Optics* 7th edition Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1999.
- 3 Velzel C. *A Course in Lens Design*. Springer: The Netherlands. 2014.
- 4 Yu NF, Genevet P, Kats MA, Aieta F, Tetienne J-P et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science* 2011; 334: 333–337.
- 5 Kildishev AV, Boltasseva A, Shalae VM. Planar photonics with metasurfaces. *Science* 2013; 339: 1232009.
- 6 Aieta F, Genevet P, Kats MA, Yu NF, Blanchard R et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2012; 12: 4932–4936.
- 7 Yu NF, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13: 139–150.
- 8 Yu NF, Genevet P, Aieta F, Kats MA, Blanchard R et al. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 2013; 19: 4700423.
- 9 Lu WT, Sridhar S. Flat lens without optical axis: Theory of imaging. *Opt Express* 2005; 13: 10673–10680.
- 10 Chen XZ, Huang LL, Mühlenbernd H, Li GX, Bai BF et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light. *Nat Commun* 2012; 3: 1198.
- 11 West PR, Stewart JL, Kildishev AV, Shalae VM, Shkunov VV et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22: 26212–26221.
- 12 Lin DM, Fan PY, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345: 298–302.
- 13 Mueller JPB, Leosson K, Capasso F. Ultracompact metasurface in-line polarimeter. *Optica* 2016; 3: 42–47.
- 14 Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters. *Optica* 2015; 2: 716–723.
- 15 Papasimakis N, Luo ZQ, Shen ZX, De Angelis F, Di Fabrizio E et al. Graphene in a photonic metamaterial. *Opt Express* 2010; 18: 8353–8359.
- 16 Yao Y, Kats MA, Genevet P, Yu NF, Song Y et al. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas. *Nano Lett* 2013; 13: 1257–1264.
- 17 Fang ZY, Wang YM, Schlather AE, Liu Z, Ajayan PM et al. Active tunable absorption enhancement with graphene nanodisk arrays. *Nano Lett* 2014; 14: 299–304.
- 18 Rodrigo D, Limaj O, Janner D, Etezadi D, de Abajo FJG et al. Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene. *Science* 2015; 349: 165–168.
- 19 Chen H-T, Padilla WJ, Zide JMO, Gossard AC, Taylor AJ et al. Active terahertz metamaterial devices. *Nature* 2006; 444: 597–600.
- 20 Padilla WJ, Taylor AJ, Highstrete C, Lee M, Averitt RD. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies. *Phys Rev Lett* 2006; 96: 107401.
- 21 Chen H-T, O'Hara JF, Azad AK, Taylor AJ, Averitt RD et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials. *Nat Photon* 2008; 2: 295–298.
- 22 Tao H, Strikwerda AC, Fan K, Padilla WJ, Zhang X et al. Reconfigurable terahertz metamaterials. *Phys Rev Lett* 2009; 103: 147401.
- 23 Luther JM, Jain PK, Alivisatos AP. Localized surface plasmon resonances arising from free carriers in doped quantum dots. *Nat Mater* 2011; 10: 361–366.

- 24 Dicken MJ, Aydin K, Pryce IM, Sweatlock LA, Boyd EM et al. Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO₂ phase transition. *Opt Express* 2009; 17: 18330–18339.
- 25 Kats MA, Blanchard R, Genevet P, Yang Z, Qazilbash MM et al. Thermal tuning of mid-infrared plasmonic antenna arrays using a phase change material. *Opt Lett* 2013; 38: 368–370.
- 26 Kats MA, Sharma D, Lin J, Genevet P, Blanchard R et al. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material. *Appl Phys Lett* 2012; 101: 221101.
- 27 Soares BF, Jonsson F, Zheludev NI. All-optical phase-change memory in a single gallium nanoparticle. *Phys Rev Lett* 2007; 98: 153905.
- 28 Vivekchand SRC, Engel CJ, Lubin SM, Blaber MG, Zhou W et al. Liquid Plasmonics: Manipulating surface plasmon polaritons via phase transitions. *Nano Lett* 2012; 12: 4324–4328.
- 29 Strohfeldt N, Tittl A, Schäferling M, Neubrech F, Kreibig U et al. Yttrium hydride nanoantennas for active plasmonics. *Nano Lett* 2014; 14: 1140–1147.
- 30 Sterl F, Strohfeldt N, Walter R, Griessen R, Tittl A et al. Magnesium as novel material for active plasmonics in the visible wavelength range. *Nano Lett* 2015; 15: 7949–7955.
- 31 Gholipour B, Zhang JF, MacDonald KF, Hewak DW, Zheludev NI. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch. *Adv Mater* 2013; 25: 3050–3054.
- 32 Michel A-KU, Chigrin DN, Maß TWW, Schöner K, Salinga M et al. Using low-loss phase-change materials for mid-infrared antenna resonance tuning. *Nano Lett* 2013; 13: 3470–3475.
- 33 Tittl A, Michel A-KU, Schäferling M, Yin XH, Gholipour B et al. A switchable mid-infrared plasmonic perfect absorber with multispectral thermal imaging capability. *Adv Mater* 2015; 27: 4597–4603.
- 34 Yin XH, Schäferling M, Michel A-KU, Tittl A, Wuttig M et al. Active chiral plasmonics. *Nano Lett* 2015; 15: 4255–4260.
- 35 Wang Q, Rogers ETF, Gholipour B, Wang C-M, Yuan GH et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials. *Nat Photon* 2016; 10: 60–65.
- 36 Mörz F, Steinle T, Steinmann A, Giessen H. Multi-Watt femtosecond optical parametric master oscillator power amplifier at 43 MHz. *Opt Express* 2015; 23: 23960–23967.
- 37 Shportko K, Kremers S, Woda M, Lencer D, Robertson J et al. Resonant bonding in crystalline phase-change materials. *Nat Mater* 2008; 7: 653–658.
- 38 Glybovski SB, Tretyakov SA, Belov PA, Kivshar YS, Simovski CR. Metasurfaces: From microwaves to visible. *Phys Rep* 2016; 634: 1–72.
- 39 Munk BA. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. 2005.
- 40 Huang LL, Chen XZ, Mühlenbernd H, Li GX, Bai BF et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation. *Nano Lett* 2012; 12: 5750–5755.
- 41 Chen WT, Yang K-Y, Wang C-M, Huang Y-W, Sun G et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images. *Nano Lett* 2014; 14: 225–230.
- 42 Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotechnol* 2015; 10: 937–943.
- 43 Ellenbogen T, Seo K, Crozier KB. Chromatic plasmonic polarizers for active visible color filtering and polarimetry. *Nano Lett* 2012; 12: 1026–1031.
- 44 Bruns G, Merkelbach P, Schlockermann C, Salinga M, Wuttig M et al. Nano-second switching in GeTe phase change memory cells. *Appl Phys Lett* 2009; 95: 043108.
- 45 Michel A-KU, Zalden P, Chigrin DN, Wuttig M, Lindenberg AM et al. Reversible optical switching of infrared antenna resonances with ultrathin phase-change layers using femtosecond laser pulses. *ACS Photon* 2014; 1: 833–839.
- 46 Hirayama K, Glytsis EN, Gaylord TK, Wilson DW. Rigorous electromagnetic analysis of diffractive cylindrical lenses. *J Opt Soc Am A* 1996; 13: 2219–2231.
- 47 Khorasaninejad M, Chen WT, Devlin RC, Oh J, Zhu AY et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging. *Science* 2016; 352: 1190–1194.
- 48 Chen YG, Kao TS, Ng B, Li X, Luo XG et al. Hybrid phase-change plasmonic crystals for active tuning of lattice resonances. *Opt Express* 2013; 21: 13691–13698.
- 49 Hosseini P, Wright CD, Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films. *Nature* 2014; 511: 206–211.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© The Author(s) 2017