無偏光・超高屈折率・低反射な 0.3 THz 波帯メタサーフェスとメタレンズへの応用

Polarization-independent metasurfaces with extremely high refractive index and low reflectance in the 0.3-THz waveband for metalens

○佐藤　建都 [1]　　鈴木　健仁 [1,2,*]　　○Kento Sato [1]　　Takehito Suzuki[1,2,*]
東京農工大学 工学府 電気電子工学専攻 [1]　　国立研究開発法人 科学技術振興機構 さきがけ [2]
Department of Electrical and Electronics Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology[1]
Japan Science and Technology Agency, PRESTO[2]

1. まえがき

次世代の高速無線通信[1]やイメージング[2]のための高性能なテラヘルツデバイスの実現には、テラヘルツ波帯光源のみならず、光源から放射されたテラヘルツ波を制御するレンズ素子の小型化が不可欠である。メタサーフェスを応用したメタレンズはシクロオレフィンポリマー(屈折率 1.53)やシリコン(屈折率 3.56)から作られる従来のコリメートレンズよりも薄型に設計できるため、近年活発に研究されている[3-5]。[5]の超高屈折率かつ低反射なメタレンズは、従来のコリメートレンズと異なり偏光特性を有する。無偏光・超高屈折率・低反射なメタレンズが実現できれば、光源へメタレンズを実装する際に、回転方向の位置合わせが不要になる利点がある。本稿ではまず 0.3 THz 帯で無偏光・超高屈折率・低反射なメタサーフェスを、これまでに我々が提案した[6]の構造に追加して報告する。さらに[6]の無偏光・超高屈折率・低反射なメタサーフェスを応用したメタレンズを 0.3 THz 帯で設計し、偏光特性を解析により検証したので報告する。

2. 0.3 THz 帯無偏光・超高屈折率・低反射なメタサーフェス

メタサーフェスは誘電体基板と、誘電体基板の両面に周期的に配置した金属パッチで構成されている。誘電体基板には厚さ 23 μm のシクロオレフィンポリマー(屈折率 n_{COP} =1.53 + j0.0012)、金属パッチには厚さ 0.5 μm の銅(導電率σ = 5.8×10^7 S/m)を用いた。誘電体基板の両面に配置した金属パッチで磁性の共振を制御することで、高屈折率でありながら低反射な材料特性[7]を実現できる。金属パッチの形状は正方形と十字型とした。パッチの大きさ l と、パッチの配置間隔 s を変化させ、高屈折率かつ低反射となるパラメータを設計した。図 1 に(a)正方形パッチ構造、(b)十字型パッチ構造のメタサーフェスを示す。それぞれのメタサーフェスを xy 平面上でγ方向に 0 度から 360 度まで 10 度ずつ回転させ、それぞれの回転角で光学定数を導出[8]することで、偏光特性を導出した。実験にはテラヘルツ時間領域分光法(Toptica Photonics 社製 Teraflash)を用いた。表 1 に(a)正方形パッチ構造、(b)十字型パッチ構造、(c)円形パッチ構造メタサーフェス[6]における回転角γ = 0 度のときの中心周波数、帯域幅、実効屈折率、透過位相遅れ、透過電力、反射電力の実験結果を示す。中心周波数は、0.3 THz 付近で反射電力が最も小さくなる周波数としている。帯域幅は反射電力が 30%以下となる周波数領域としている。正方形パッチ構造メタサーフェスでは、0.31 THz で実効屈折率 n_{eff} = 14.0 + j0.48、透過位相遅れ 125 度、透過電力 86.9%、反射電力 1.03%を実験で確認した。十字型パッチ構造メタサーフェスでは 0.315 THz で実効屈折率 n_{eff} = 8.36 + j1.90、透過位相遅れ 80.5 度、透過電力 48.6%、反射電力 14.6%を実験で確認した。円形パッチ構造メタサーフェスでは 0.31 THz で実効屈折率 n_{eff} = 12.3 + j0.566、透過位相遅れ 110 度、透過電力 83.5%、反射電力 1.46%を実験で確認した[6]。それぞれのメタサーフェスの光学定数はメタサーフェスの回転角に関わらず一定となり、無偏光特性を有することを実験で確認した。

3. 0.3 THz 波帯無偏光なメタレンズの設計

図 2(a)に光源からの放射波を平面波に変換するメタレンズ A を、(b)にメタレンズ A の断面図を示す。メタレンズ A は誘電体基板の両面に円形金属パッチを対称に配置して設計した。[4]のメタレンズは誘電率のみを制御して波面整形している。一方で図 2 の円形パッチ構造メタレンズは両面に配置した金属パッチにより、比誘電率に加え比透磁率も制御することで反射を抑えている。光源には 0.356×0.711 mm の方形導波管(WR2.8DH)を設定している。光源とメタレンズの距離は 3 mm とした。メタレンズの厚さは 51 μm(誘電体基板の厚さ: 50 μm 金属パッチの厚さ: 0.5 μm)、直径は 3.4 mm とした。パッチの大きさ l とパッチの円周方向の配置間隔 s を設計することで、任意の透過位相遅れを実現できる。光源からの放射波と理想的な平面波との位相差から所望の位相遅れを計算し、配置するパッチの大きさ l と、パッチの配置間隔 s を決定した。図 3(a)に光源のみ、円形パッチ構造のメタレンズ A、メタレンズ A から電磁波の出射側のパッチを取り除いたメタレンズ B、[5]と同様のカット金属ワイヤー構造を有するメタレンズ C の、yz 面における指向性利得を示す。指向性利得の単位は、光源の指向性利得を 1 として規格化している。円形パッチ構造メタレンズ A により、光源からの放射波の指向性利得が 2.2 倍向上することを解析で確認した。メタレンズ A とメタレンズ B の指向性利得の比較から、両面金属パッチ構造による磁性の共振が光源の指向性利得向上に寄与する可能性を確認した。図 3(b)に、それぞれのメタレンズを xy 面内でγ方向に 0 度から 360 度まで 30 度ずつ回転させた場合の、yz 面における指向性利得の変化を示す。円形パッチ構造のメタレンズ A は金属カットワイヤー構造のメタレンズ C と比較して最大の指向性利得は低いものの、γ方向の回転に対するロバスト性を有することを解析で確認した。

4. まとめ

0.3 THz 帯で動作する無偏光・超高屈折率・低反射なメタサーフェスを報告した。正方形パッチ構造、円形パッチ構造のメタサーフェス[6]では無偏光でありながら 0.3 THz 帯で 10 を超える屈折率と 3%未満の反射電力を実験で確認した。十字型パッチ構造のメタサーフェスでは無偏光でありながら 0.3 THz 帯で 8 を超える屈折率と 20%未満の反射電力を実験で確認した。さらに円形パッチ構造メタサーフェス[6]を応用したメタレンズ A を設計した。メタレンズ A は、[5]と同様のカット金属ワイヤー構造のメタレンズ C と比較してγ方向の回転に対しロバスト性を有することを解析で確認した。今後、メタレンズ A の試作と実験評価を進める。

謝辞

本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR18I5)、文部科学省科研費基盤(C)(18K04970)、公益財団法人東電記念財団、公益財団法人稲盛財団、公益財団法人 GMO インターネット財団の助成を受けたものである。

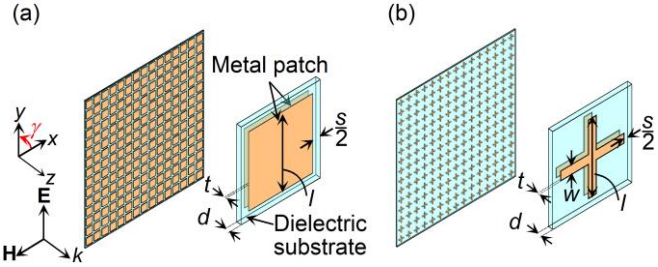
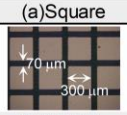
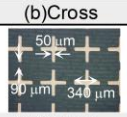
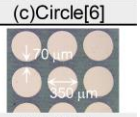


Fig. 1 Poralization-independent metasurfaces consisting of (a) square patches and (b) cross patches.

Table 1 Photographs and measured optical constants of the fabricated metasurfaces at γ = 0 degrees.

Patch	(a)Square	(b)Cross	(c)Circle[6]
			
Center frequency	0.310 THz	0.315 THz	0.310 THz
Band-width	0.3-0.315 THz	0.31-0.32 THz	0.295-0.315 THz
Refractive index	14.0 + j0.48	8.36 + j1.90	12.3 + j0.566
Phase delay	125 degrees	80.5 degrees	110 degrees
Transmittance	86.9%	48.6%	83.5%
Reflectance	1.03%	14.6%	1.46%

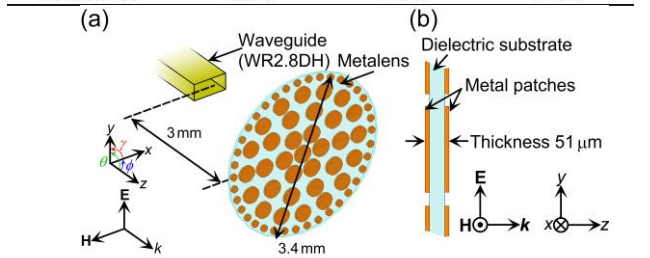


Fig. 2(a)The bird's-eye and (b)cross-section enlarged views of the metalens A consisting of circle paches.

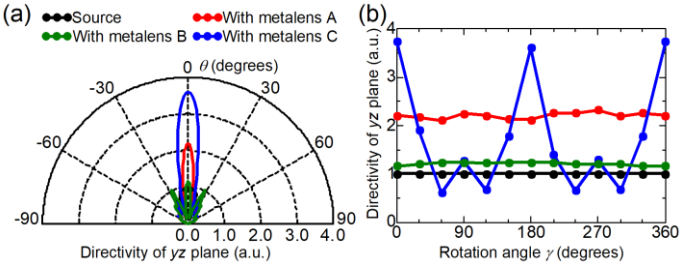


Fig. 3 Simulated directivity of the metalenses (a) in the yz-plane and (b) with rotated angles γ in the xy-plane.

参考文献

[1] T. Nagatsuma et al., Nat. Photonics **10**(6), 371-379 (2016).
[2] D. M. Mittleman, Opt. Express **26**(8), 9417-9431 (2018).
[3] H. Chen et al., Opt. Express **26**(23), 29817-29825 (2018).
[4] 張 他, 電子情報通信学会論文誌 B **J95-B**(12), 1634-1641 (2012).
[5] T. Suzuki, K. Endo, and S. Kondoh, "Terahertz metasurface ultra-thin collimator for power enhancement," Opt. Express (in press). https://doi.org/10.1364/OE.392814.
[6] 佐藤, 中尾, 鈴木, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-PA2-10, 北海道大学 札幌キャンパス (2019).
[7] K. Isihara and T. Suzuki, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **38**(9), 1130–1139 (2017).
[8] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**(016608), (2004).