

## 無偏光・ゼロ屈折率・無反射な 0.3 THz 帯メタサーフェスの設計

Design of polarization-independent reflectionless metasurface with zero refractive index in the 0.3-THz band

◎望月 景太<sup>1</sup> 佐藤 建都<sup>2</sup> 鈴木 健仁<sup>3,4\*</sup> Keita Mochizuki<sup>1</sup> Kento Sato<sup>2</sup> Takehito Suzuki<sup>3,4\*</sup>東京農工大学 工学部 電気電子工学科<sup>1</sup> 工学府 電気電子工学専攻<sup>2</sup> 工学研究院 先端電気電子部門<sup>3</sup>国立研究開発法人 科学技術振興機構 さきがけ<sup>4</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering<sup>1</sup>, Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering<sup>2</sup>, Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering<sup>3</sup>, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan Science and Technology Agency, PRESTO<sup>4</sup>

## 1. まえがき

メタサーフェスは自然界の材料では実現できない高屈折率、ゼロ屈折率、負の屈折率などの幅広い屈折率を、無反射な特性で実現できる人工構造材料である[1]。著者らは、[2]で比誘電率と比透磁率をともに0に近づけて設計して、0.5 THz帯で屈折率0.16、反射率0.7%のメタサーフェスを報告している。しかしながら、[2]のゼロ屈折率・無反射なメタサーフェスは偏光特性を有している。そこで本稿では、0.3 THz帯の光源での応用も見据えて、無偏光・ゼロ屈折率・無反射な0.3 THz帯メタサーフェスを設計したので報告する。他研究グループの先行研究で、1以下の低屈折率を有するメタサーフェスによる、テラヘルツ光源の指向性利得向上の可能性が解析で報告されている[3]。設計した無偏光・ゼロ屈折率・無反射メタサーフェスは、6G(Beyond5G)高速無線通信[4]やテラヘルツイメージング[5]に利用できる可能性がある。

## 2. 無偏光・ゼロ屈折率・無反射なメタサーフェスの構造

図1(a)と(b)にそれぞれ0.31 THzで設計した無偏光・ゼロ屈折率・無反射なメタサーフェスの全体構造と3での設計に用いる周期構造モデルを示す。メタサーフェスは、誘電体基板の表と裏の両面に、一辺の長さが波長の3分の1程度の金属正方形パッチを周期的に配置している。誘電体基板の両面に配置した金属正方形パッチにより、誘電性と磁性の共振を同時に制御できる[6]。0.31 THzにおいて比誘電率と比透磁率の両方を0に近づけることで、ゼロ屈折率かつ無反射な特性を設計した。金属正方形パッチはx軸とy軸の両方に対称な構造なので、無偏光な特性で動作する。誘電体基板には厚さ50  $\mu\text{m}$ のシクロオレフィンポリマー(屈折率  $n = 1.53 + j0.0012$ )を用いた。金属パッチには厚さ0.5  $\mu\text{m}$ の銅(複素導電率  $\sigma = 5.87 \times 10^7 + j2.84 \times 10^6 \text{ S/m}$ )を用いた。金属正方形パッチの一辺の長さ  $l$  と配置間隔  $s$  はそれぞれ  $l = 300 \mu\text{m}$ 、 $s = 595 \mu\text{m}$  である。

## 3. メタサーフェスの設計結果

図1(a)のメタサーフェスはx軸、y軸方向に無限周期構造とみなせるため、図1(b)の周期構造モデルで設計した。図2(a)–(e)にそれぞれメタサーフェスの実効屈折率、比誘電率、比透磁率、反射率と透過率と比インピーダンスの周波数特性の設計結果を示す。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。解析から得られた散乱行列により、実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  を導出した[7]。解析により、設計周波数の0.31 THzで、実効屈折率  $-0.28 + j0.023$ 、比誘電率  $-0.29 + j0.017$ 、比透磁率  $-0.28 + j0.029$ 、反射率約0%、透過率98.5%、比インピーダンス  $0.98 - j0.024$  を確認した。解析により、0.31 THzで、誘電性の損失と磁性の損失の和  $|\mu_r| \text{Im}(\epsilon_r) + |\epsilon_r| \text{Im}(\mu_r) = 0.013$  であり、エネルギー保存則を満たしている[8]。図3にメタサーフェスの偏光特性の解析結果を示す。入射波の偏光をxy平面内で  $\phi = 0$  度から360度まで10度刻みで回転させ、それぞれの角度で実効屈折率実部と反射率を導出した。図3中の赤枠は  $\phi = 0$  度のときに屈折率実部の値が  $-0.28$  から  $0.39$  となる範囲を示している。解析により、入射波の偏光方向にかかわらず、0.31 THzにおいてゼロ屈折率・無反射な特性となることを確認した。0.33から0.34 THzで2次的な共振が見受けられる。

## 4. まとめ

0.31 THzで無偏光・ゼロ屈折率・無反射なメタサーフェスを設計した。解析により、0.31 THzで無偏光・ゼロ屈折率・無反射となることを確認した。今後、設計したメタサーフェスを作製し、テラヘルツ時間領域分光法により評価する。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)(21H01839)、国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ(JPMIPR1815)、公益財団法人東電記念財団の助成を受けたものである。

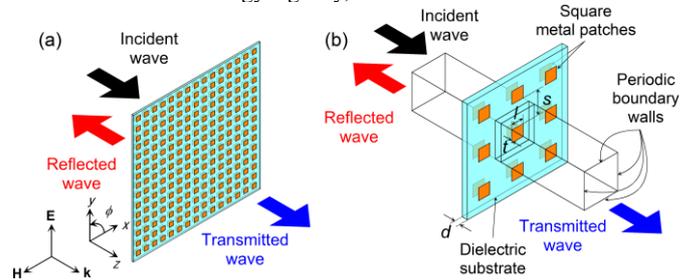


Fig. 1 (a) Full model and (b) one-unit cell model for polarization-independent reflectionless metasurface with zero refractive index consisting of square metal patches.

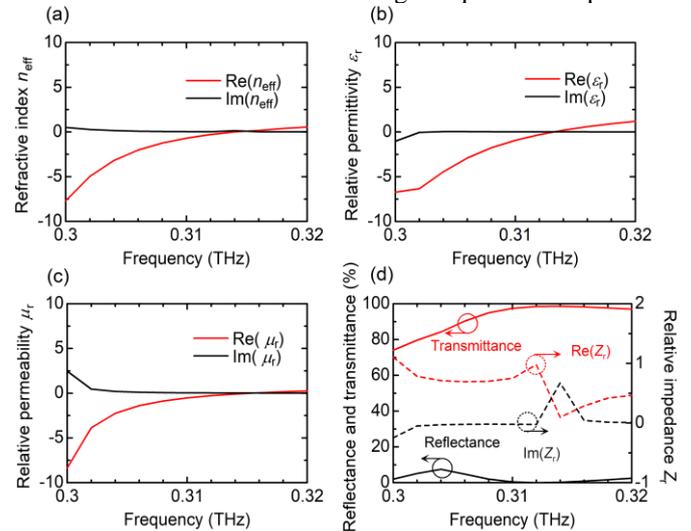


Fig. 2 Simulated frequency characteristics of (a) refractive index, (b) relative permittivity, (c) relative permeability, and (d) transmittance, reflectance, and relative impedance.

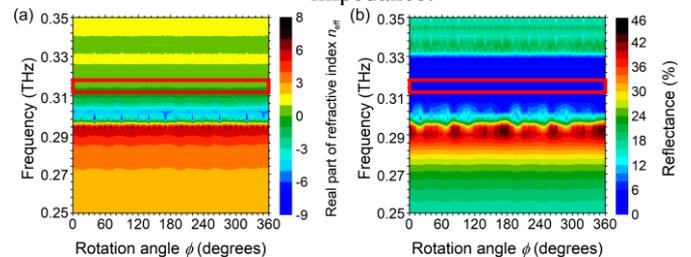


Fig. 3 Simulated contour maps of (a) real part of refractive index and (b) reflectance with a rotation angle  $\phi$  on the xy-plane for the derivation of polarization-independent properties.

## 参考文献

- [1] 鈴木, 応用物理, **86**(10), 897–902 (2017).
- [2] T. Suzuki, and H. Asada, *Opt. Express* **28**(15), 21509–21521 (2020).
- [3] Q. -L. Zhang et al., *AIP Advances* **4**(3), 037103 (2014).
- [4] T. Nagatsuma et al., *Nat. Photonics* **10**(6), 371–379 (2016).
- [5] D. M. Mittleman, *Opt. Express* **26**(8), 9417–9431 (2018).
- [6] K. Isihara and T. Suzuki, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **38**(9), 1130–1139 (2017).
- [7] X. Chen et al., *Phys. Rev. E* **70**(1), 016608 (2004).
- [8] Y. Minowa et al., *Opt. Express* **16**(7), 4785–4796 (2008).