

金属対称ペアカットワイヤーによる 0.5 THz 帯ゼロ近傍屈折率無反射 2 次元メタマテリアル Two-dimensional Metamaterial with a Refractive Index of Near Zero and No Reflection Consisting of Symmetric Metallic Cut Wires in the 0.5-THz Band

○木村 辰也¹ 安田 淳一² 鈴木 健仁^{1,2*}

○Tatsuya Kimura¹ Junichi Yasuda² Takehito Suzuki^{1,2*}

茨城大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻¹ 茨城大学 工学部 電気電子工学科²

Major in Electrical and Electronic Engineering, Ibaraki University¹

Department of Electrical and Electronic Engineering, Ibaraki University²

*E-mail: takehito.suzuki.antenna@vc.ibaraki.ac.jp, <http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>

1. まえがき

メタマテリアルは比誘電率と比透磁率を制御することで自然界には存在しない屈折率を実現できる。テラヘルツ波帯では、高屈折率極低反射メタマテリアル[1]や負の屈折率メタマテリアル[2, 3]が実現されている。ゼロ屈折率を有する 3 次元メタマテリアルを実現できれば、構造中の位相速度や波長が無限大となり、構造的には波長に対して巨大にも関わらず、電磁界的には点として振舞う魅力的な特長を幅広く応用できる可能性がある[4]。本稿では、金属対称ペアカットワイヤーにより比誘電率と比透磁率を同時に制御し、0.51 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 0.11 + j0.26$ を実現したので報告する。

2. ゼロ近傍屈折率無反射 2 次元メタマテリアルの設計

図 1 は金属対称ペアカットワイヤーによる 0.5 THz 帯ゼロ近傍屈折率無反射メタマテリアルである。図 2 に設計モデルを示す。金属カットワイヤーを誘電体基板の裏表に对称に配置している。全体構造は波長よりも大規模であり、 x 軸と y 軸方向に無限周期構造としてみなせるため、周期境界壁により 1 周期分を抜き出している。図 3 に金属対称ペアカットワイヤーの長さ l と金属カットワイヤー間のギャップ g を変化させた等高線図を示す。その他のパラメータは、 $s = 360 \mu\text{m}$ 、 $w = 125 \mu\text{m}$ 、 $d = 50 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.5 \mu\text{m}$ で固定している。金属対称ペアカットワイヤーには導体損を低減するために銅 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ を用いた。誘電体基板はテラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマー $n_{\text{COP}} = 1.53 + j0.0012(0.50 \text{ THz})$ を用いた。解析には電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.13.0.2 を用いた。解析モデルから求まる散乱行列より、厚さは $d + 2t$ として実効屈折率 n_{eff} を導出した[5]。図 3 の等高線図に示した X マークのパラメータ ($l = 205 \mu\text{m}$ 、 $g = 105 \mu\text{m}$) により、実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 0.0008 + j0.06$ 、透過電力 97.6% を設計した。

3. ゼロ近傍屈折率無反射 2 次元メタマテリアルの作製と実験

銅を成膜したシクロオレフィンポリマーフィルムをエッチング加工することで作製した。銅の厚さは表皮厚を考慮し $0.5 \mu\text{m}$ である。作製した金属ペアカットワイヤーの各パラメータは $l = 202.2 \mu\text{m}$ 、 $g = 106.0 \mu\text{m}$ 、 $s = 360.7 \mu\text{m}$ 、 $w = 120.2 \mu\text{m}$ である。図 4 にテラヘルツ時間領域分光法による実験結果と作製パラメータでの解析結果を示す。実験により 0.51 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 0.11 + j0.26$ となり、透過電力が約 100% となることを確認した。0.48 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = -1.3 + j0.0014$ であることから、0.48 THz から 0.51 THz の間でゼロ屈折率が実現できていると推測できる。0.49 THz から 0.50 THz では実効屈折率 n_{eff} の導出時に非物理的な解を有する可能性があり省いている。反射測定時に素子フィルムの盛り上がりにより、片道の光路長が基準面とフィルム端面で $63 \mu\text{m}$ 長くずれていると見積もり実験結果を補正している。

4. まとめ

金属対称ペアカットワイヤーによる 0.5 THz 帯ゼロ近傍屈折率無反射 2 次元メタマテリアルを設計、作製し、実験により 0.51 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 0.11 + j0.26$ 、透過電力が約 100% となることを確認した。今後、本構造を活用しゼロ屈折率を有する 3 次元メタマテリアルへの応用を進める。

参考文献

- [1] K. Ishihara and T. Suzuki, The 76th JSAP Autumn Meeting, 2015, 14a-2s-5 (2015).
- [2] M. Awad et al., Opt. Lett. **33**, 2683 (2008).

- [3] Y. Takebayashi et al., IEEE Trans. Sens. Micromach. **135**, 476 (2015).
- [4] A. M. Mahmoud and N. Engheta, Nat. Commun. **5**, 5638 (2014).
- [5] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**, 016608 (2004).

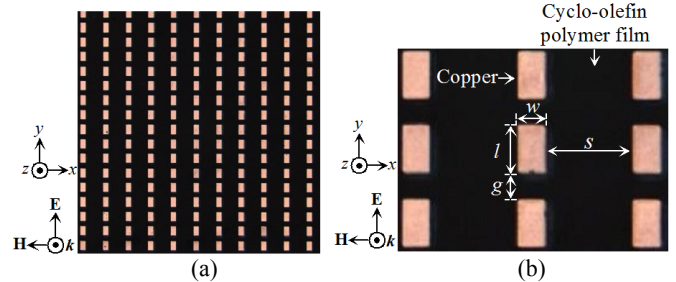


Fig. 1 (a) Two-dimensional metamaterial with a refractive index of near zero and no reflection in the 0.5-THz band. (b) Enlarged view of the symmetric metallic cut wires.

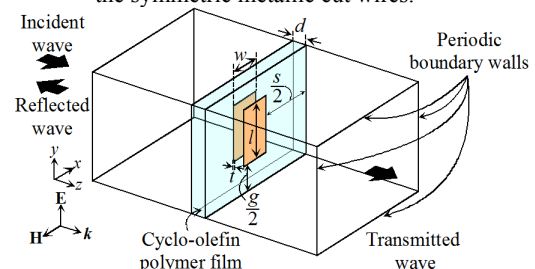


Fig. 2 Unit design model of the metallic cut wires.

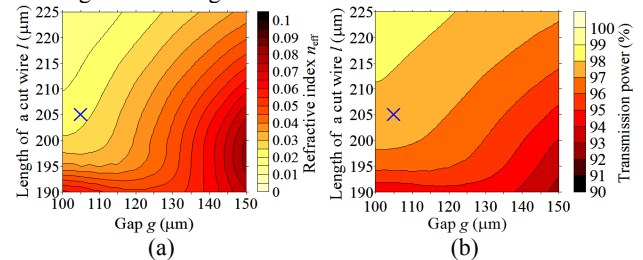


Fig. 3 (a) Contour map of effective refractive indices at 0.50 THz. (b) Contour map of transmission power at 0.50 THz.

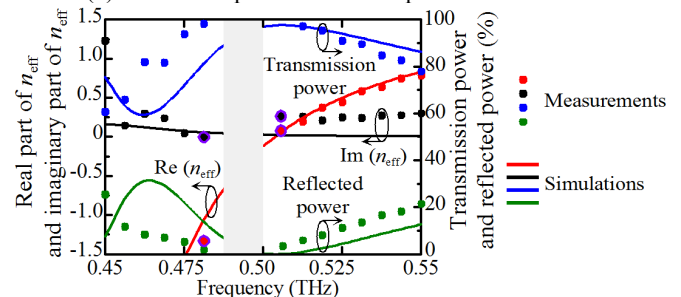


Fig. 4 Measurements and simulations of the two-dimensional metamaterial with a refractive index of near zero and no reflection. 謝辞 本研究の一部は、文部科学省科研費若手研究 (A)(26706017)、文部科学省科研費挑戦的萌芽研究(26600108)の助成、JST 重要知財集約活用制度スーパーハイウェイ (SHW005)の委託を受けたものである。また、テラヘルツ時間領域分光法による実験にご協力いただいた有限会社スペクトルデザインの高橋功将様、碓智文博士に深く感謝申し上げます。