

金属対称ペアカットワイヤーによる 1.0 THz 帯負の屈折率 2 次元メタマテリアル Two-Dimensional Metamaterial with a Negative Refractive Index Consisting of Symmetric Paired Cut Wires in the 1.0-THz Band

○安田 淳一¹ 木村 辰也² 鈴木 健仁^{1,2*}

○Junichi Yasuda¹ Tatsuya Kimura² Takehito Suzuki^{1,2*}

茨城大学 工学部 電気電子工学科¹

茨城大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻²

Department of Electrical and Electronic Engineering, Ibaraki University¹

Major in 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同時に制御することで、自然界には存在しない負の屈折率を実現できる。負の屈折率メタマテリアルを用いることで回折限界を突破可能なテラヘルツ波帯スーパーレンズを実現でき、テラヘルツイメージングへ応用できる。近年、テラヘルツ波帯での負の屈折率の実験値として、0.47 THz で I 構造により $n_{\text{eff}} = -2.0 + j1.3$ [1]、0.42 THz で非対称な金属ペアカットワイヤー構造により実効屈折率 $n_{\text{eff}} = -4.4 + j0.25$ [2, 3] が報告されている。本稿では、厚さ 50 μm の基板上に対称な金属ペアカットワイヤー構造 [4] を作製し、0.50 THz で $n_{\text{eff}} = -1.4 + j0.058$ を実現した。さらに厚さ 23 μm と基板を薄くすることにより、1.05 THz で $n_{\text{eff}} = -5.1 + j0.61$ を実現した。

2. 金属対称ペアカットワイヤーによる負の屈折率設計

図 1(a)、(b) にそれぞれ 0.50 THz と 1.05 THz で負の屈折率となる金属対称ペアカットワイヤーによる 2 次元メタマテリアルを示す。誘電性と磁性の共振を同時に設計周波数で起こすことで、負の屈折率を実現できる [4]。図 2 に対称な金属ペアカットワイヤーの設計モデルを示す。全体構造は波長に対して大規模なので、 x 、 y 軸方向に周期境界壁を設けることで無限周期構造と仮想して、設計できる。

設計周波数 0.50 THz で、 $d = 50 \mu\text{m}$ 、 $l = 203.7 \mu\text{m}$ 、 $g = 125.5 \mu\text{m}$ により $n_{\text{eff}} = -0.051 + j0.16$ 、透過電力 92.4%、反射電力 4.43% を設計した。設計周波数 1.05 THz で、 $d = 23 \mu\text{m}$ 、 $l = 89.9 \mu\text{m}$ 、 $g = 59.9 \mu\text{m}$ により、 $n_{\text{eff}} = -2.7 + j0.13$ 、透過電力 40.1%、反射電力 51.2% を設計した。表 1 に d 、 l 、 g 以外の設計パラメータを示す。金属カットワイヤーには銅の導電率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ を用い、誘電体基板にはシクロオレフィンポリマーの屈折率 $n_{\text{COP}} = 1.53 + j0.0012$ (0.5 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。設計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} を算出した [5]。

3. 金属対称ペアカットワイヤーの作製と実験評価

銅をテラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマーフィルム上に両面成膜し、エッチング加工により作製した。図 3、図 4 にそれぞれ設計周波数 0.50 THz、1.05 THz での実験と解析結果を示す。図 1(a) の素子について 0.50 THz で $n_{\text{eff}} = -1.4 + j0.058$ 、透過電力 84.1%、反射電力 29.3% を実験により確認した。また図 1(b) の素子について 1.05 THz で $n_{\text{eff}} = -5.1 + j0.61$ 、透過電力 30.9%、反射電力 31.2% を実験により確認した。実験にはテラヘルツ時間領域分光法を用いた。図 1(a)、(b) の素子の反射測定時に素子フィルムの盛り上がりにより、片側の光路長が基準点とフィルム端面が (a) は 180 μm 、(b) は 190 μm 長くずれていると見積もり、実験結果を補正した。

4. まとめ

厚さ 50 μm の誘電体基板上に対称な金属ペアカットワイヤー構造を作製し、実験により 0.50 THz で負の屈折率 $n_{\text{eff}} = -1.4 + j0.058$ を確認した。さらに厚さ 23 μm と薄くした誘電体基板を用いることで、実験により 1.05 THz で負の屈折率 $n_{\text{eff}} = -5.1 + j0.61$ を確認した。

参考文献

- [1] M. Awad et al., Opt. Lett. **33**, 2683 (2008).
- [2] Y. Takebayashi et al., IEICE Technical Group on Terahertz Application

- System, 11 (2015).
- [3] Y. Takebayashi et al., IEEJ Trans. Sens. Micromach. **135**, 476 (2015).
- [4] P. Weis et al., Appl. Phys. Lett. **95**, 171104 (2009).
- [5] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**, 016608 (2004).

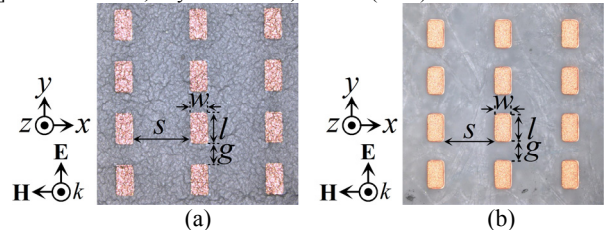


Fig. 1 Laser microscope image of the metamaterial with a negative refractive index of (a) $-1.4 + j0.058$ at 0.50 THz and (b) $-5.1 + j0.61$ at 1.05 THz.

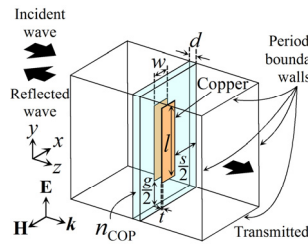


Fig. 2 Unit cell model of the symmetric cut wires.

Table 1 Parameters of the fabricated symmetric metal cut wires.

f	0.49 THz	1.1 THz
w	118.2 μm	53.9 μm
s	357.1 μm	159.8 μm
t	0.5 μm	0.5 μm

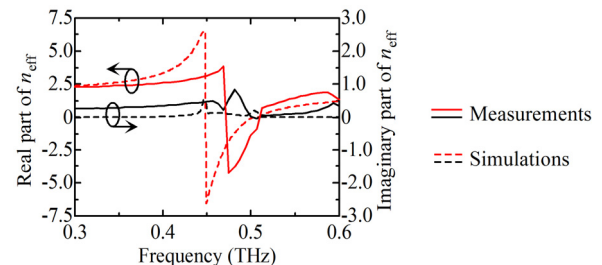


Fig. 3 Measurements and simulations of metamaterial with negative refractive indices in the 0.4-THz band.

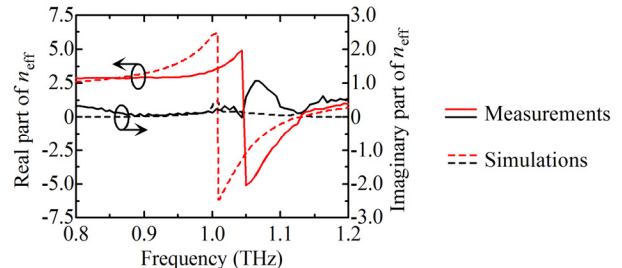


Fig. 4 Measurements and simulations of metamaterial with negative refractive indices in the 1.0-THz band.

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、厚さ 23 μm の銅成膜シクロオレフィンポリマーフィルムをご提供いただいた住友金属鉱山株式会社の浅川吉幸様に深く感謝申し上げます。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。