

金属非対称ペアカットワイヤーによる 0.7 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 Asymmetric Paired Cut Wires in the 0.7 THz-Band

○近藤 諭¹ 木村 辰也² 鈴木 健仁^{1,2*}

○Satoshi Kondoh¹ 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

メタマテリアルを用いることで、比誘電率と比透磁率を任意の値に制御し、自然界には存在しない負の屈折率[1, 2]を実現できる。負の屈折率によりエバネセント波を復元することで、回折限界を超えた解像度を有するスーパーレンズを実現でき、テラヘルツ波顕微鏡へ応用できる可能性がある。テラヘルツ波帯での負の屈折率値の実験値としては、2008 年に I 字構造[3]、2015 年に金属非対称ペアカットワイヤー構造[4, 5]による負の屈折率構造が報告されている。屈折率の実部と虚部の比で表わせる性能指数 FOM は [3]では 0.47 THz で FOM = 1.48 である。[4, 5]では 0.42 THz で FOM = 17.5 と非常に低損失な値を実現している。本稿では、厚さ 50 μm の誘電体基板に金属非対称ペアカットワイヤー構造を作製し、0.76 THz で $n_{\text{eff}} = -3.4 + j0.061$ (FOM = 55) を実験により確認した。

2. 金属非対称ペアカットワイヤーによる負の屈折率設計

図 1 に金属非対称ペアカットワイヤーによる負の屈折率 2 次元メタマテリアルを示す。y 軸方向に対して表と裏でずらした非対称構造である。比誘電率と比透磁率が共に設計周波数で負の値となるよう制御することで、負の屈折率を実現できる[6, 7]。金属非対称ペアカットワイヤーのモデル外部に周期境界壁を設け 1 周期分を抜き出した図 2 のモデルで設計できる。設計には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.14.0.1 を用いた。設計モデルより得られる散乱行列から、厚さ $d + 2t$ として実効屈折率 n_{eff} を導出した[8]。金属には導体損の少ない銅 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ を用い、誘電体基板にはシクロオレフィンポリマー $n_{\text{COP}} = 1.53 + j0.0012$ (0.5 THz) を用いた。0.7 THz 波帯での設計では $d = 50 \mu\text{m}$, $l = 144.5 \mu\text{m}$, $g = 54.8 \mu\text{m}$, $w = 53.3 \mu\text{m}$, $p = 188.3 \mu\text{m}$, $t = 0.5 \mu\text{m}$ により、 $n_{\text{eff}} = -3.5 + j0.034$ (FOM = 105)、透過電力 95%、反射電力 0.073% を設計した。

3. 金属非対称ペアカットワイヤーの作製と実験評価

シクロオレフィンポリマーフィルムの両面に銅を成膜し、エッチング加工により作製した。図 3(a)に作製した素子、図 3(b)に 0.7 THz 帯素子の実験と解析結果を示す。実験にはテラヘルツ時間領域分光法を用いた。0.76 THz で、 $n_{\text{eff}} = -3.4 + j0.061$ 、透過電力 82%、反射電力 0.027% を実験により確認した。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面とフィルム端面で 150 μm 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

金属非対称ペアカットワイヤー構造により 0.7 THz 帯で負の屈折率を設計した。0.7 THz 帯負の屈折率 2 次元メタマテリアル素子を作製し、実験により 0.76 THz で $n_{\text{eff}} = -3.4 + j0.061$ (FOM = 55)、透過電力 82%、反射電力 0.027% を確認した。今後、1.0 THz 帯素子を作製し実験により評価する。

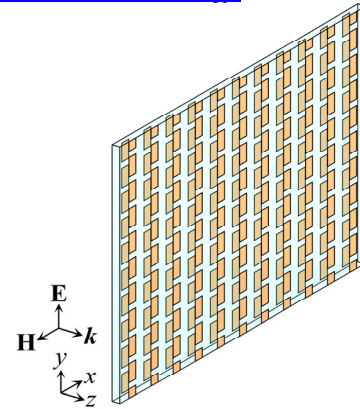


Fig. 1 Two-dimensional metamaterial with a negative refractive index consisting of asymmetric paired cut wires.

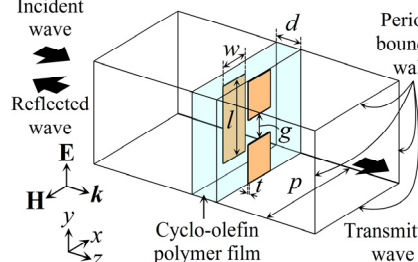


Fig. 2 Unit cell model of the asymmetric paired cut wires.

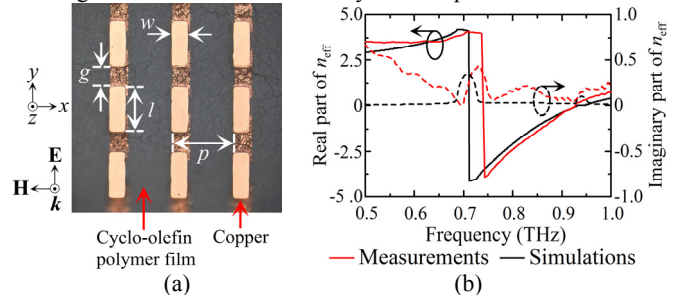


Fig. 3 (a) Laser microscope image of the fabricated metamaterial. (b) Measurements and simulations of the two-dimensional metamaterial with negative refractive indices in the 0.7 THz-band.

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、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ベ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。

参考文献

- [1] D. R. Smith et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 4184 (2000).
- [2] R. A. Shelby et al., Science **292**, 77 (2001).
- [3] M. Awad et al., Opt. Lett. **33**, 2683 (2008).
- [4] Y. Takebayashi et al., IEICE Technical Group on Terahertz Application System, 11 (2015).
- [5] Y. Takebayashi et al., IEEE Trans. Sens. Micromach. **135**, 476 (2015).
- [6] B. Kanté et al., Phys. Rev. B **79**, 075121 (2009).
- [7] H. Kubo et al., IEICE Trans. Electron. **E95-C**, 1658 (2012).
- [8] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**, 016608 (2004).