

同一種類のメタアトムによる 0.3 THz 帯の高・ゼロ・負の屈折率の実現

Terahertz Metamaterial to Demonstrate Extremely Wide Range of Refractive Indices in the 0.3-THz Band

○渡井 和央¹ 石原 功基² 近藤 諭² 佐藤 竜也² 司城 誠¹ 鈴木 健仁^{1,2*}○Kazuhisa Watai¹ Koki Ishihara² Satoshi Kondoh² Tatsuya Sato² Makoto Shijo¹ 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²Department of 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

現在、高速無線通信[1]やイメージング[2]などのテラヘルツ波技術の産業応用化が積極的に進んでいる。しかしながら、テラヘルツ波帯では高機能な光学素子の不足に悩まされている。メタマテリアルは、高屈折率、ゼロ屈折率、負の屈折率を、低反射・高透過に実現できる。本稿では、同一構造のメタアトムのパラメータ制御のみで、容易に幅広い屈折率を同一周波数帯で実現可能なことを実証した[3]。

2. 設計指針

図 1 に幅広い屈折率を実現可能なメタマテリアルの全構造モデルを示す。誘電性と磁性の共振を制御し、幅広い屈折率を同一種類のメタアトムの対称ペアカット金属ワイヤーにより設計できる。全構造モデルは波長に対して大規模であり、 x 軸、 y 軸方向に無限周期構造とみなせる。メタアトム 1 周期分を抜き出し、周期境界壁を有する単位素子モデルを解析し、屈折率を設計した。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より、実効屈折率 n_{eff} を導出した[4]。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 での測定値)を用いた。金属には銅の導電率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m を用いた。表 1 に設計した屈折率とパラメータを示す。設計周波数は 0.3 THz である。

3. 作製と実験評価

両面に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して作製した。図 2(a) に作製した高屈折率を有するメタマテリアル[5]の実寸写真を示す。図 2(b), (c), (d) に高、ゼロ、負の屈折率を有するメタマテリアルの拡大写真を示す。図 3 にテラヘルツ時間領域分光法(TOPTICA 社 TeraFlash)による実験結果と解析結果を示す。反射測定時の位相を解析値と比較し、実験結果を補正した。図 2(b), (c), (d) の反射の測定時、素子フィルムが入射面側に盛り上がっていることにより、往復の光路長が基準面と素子フィルムの端面の間で(b)は 30 μm 、(c)は 30 μm 、(d)は 90 μm 短いと見積もった。光路長のずれにより電力保存則が成り立たない周波数は省いている。図 2(b)は 0.31 THz で $n_{\text{eff}} = 12.3 + j0.96$ 、(c)は 0.34 THz で $n_{\text{eff}} = -0.37 + j0.46$ 、(d)は 0.31 THz で $n_{\text{eff}} = -5.4 + j0.31$ となることを実験で確認した。

4. まとめ

実験によりペアカット金属ワイヤーのパラメータと誘電体の厚さの制御のみで、高屈折率 12.3、ゼロ屈折率 -0.37、負の屈折率 -5.4 となる幅広い屈折率を実現できることを実証した。今後、幅広い屈折率を分布した高指向性かつ薄型なアレーアンテナへの応用を進める[6]。

謝辞

銅成膜シクロオレフィンポリマーフィルムを御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。

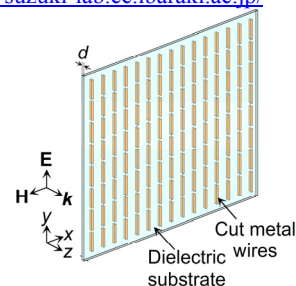


Fig. 1 Two-dimensional metamaterial consisting of symmetrically aligned paired cut metal wires.

Table 1 Parameters of the designed metamaterials.

n_{eff}	l	g	w	s	d	t
$12.2 + j1.46$	313 μm	94 μm	54 μm	86 μm	23 μm	0.5 μm
$0.53 + j0.01$	318 μm	60 μm	208 μm	597 μm	50 μm	6 μm
$-4.52 + j0.16$	307 μm	136 μm	149 μm	557 μm	50 μm	6 μm

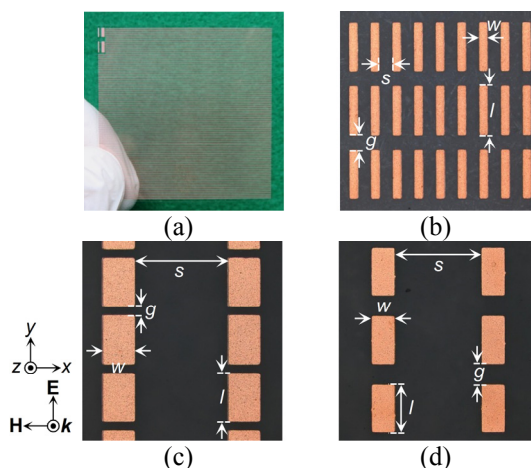


Fig. 2 (a) Photograph of the fabricated metamaterial with an extremely high refractive index [5]. Laser microscopic image of the fabricated metamaterial with (b) the extremely high [5], (c) near zero, or (d) negative refractive index.

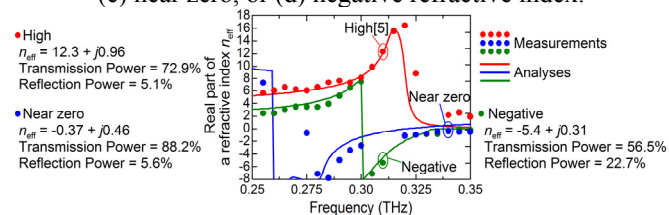


Fig. 3 Measurements and analyses of the metamaterial with the extremely high, near zero, or negative refractive index.

参考文献

- [1] T. Nagatsuma et al., Opt. Express **21**, 23736 (2013).
- [2] T. Miyamoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 032201 (2016).
- [3] K. Watai et al., 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (2017). (to be submitted)
- [4] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**, 016608 (2004).
- [5] T. Suzuki and K. Ishihara, The 77 JSAP Autumn Meeting, 2016, 16p-P1-13 (2016).
- [6] R. Ohuchi et al., IEICE Trans. Commun. **J100-B** (2017).