

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26706017

研究課題名(和文)リアルタイムテラヘルツナノイメージングのためのゼロ近傍屈折率メタマテリアルの研究

研究課題名(英文)Metamaterial with a negative refractive index for real-time terahertz imaging with sub-wavelength resolution

研究代表者

鈴木 健仁 (Suzuki, Takehito)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60550506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波帯で高透過・低反射・低損失な負の屈折率を有するメタマテリアルを実現した。誘電体基板の表裏に非対称なペアカット金属ワイヤー構造を配置した構造である。作製は両面を銅で成膜したシクロオレフィンポリマーをエッチングした。テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)により0.42 THzで負の屈折率 $-4.2+j0.17$ 、透過電力81.5%、反射電力4.3%、性能指数FOM24.2を確認した。

研究成果の概要(英文)：We demonstrate a negative refractive index metamaterial with high transmission, low reflection, and low loss in the terahertz waveband. The metamaterial with a negative refractive index consists of asymmetrically aligned paired cut metal wires on the front and back of a dielectric substrate. A cyclo-olefin polymer film with copper layers on the front and back is etched. Measurements by terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) demonstrate a metamaterial with a negative refractive index of  $-4.2+j0.17$ , high transmitted power of 81.5%, low reflected power of 4.3%, and a high figure of merit (FOM) of 24.2 at 0.42 THz.

研究分野：応用物理学・工学

キーワード：テラヘルツ波帯 メタマテリアル 負の屈折率 ゼロ屈折率 高屈折率 超高屈折率

1. 研究開始当初の背景

メタ材料は負の屈折率を有する材料を設計でき、エバネセント成分の復元により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る。負の屈折率を有する材料を設計する際、誘電性と磁性の共振周波数をメタアトムで制御し、一致させる必要がある。メタアトムとして分割リング共振器と金属ワイヤーを用いた負の屈折率を有する構造がマイクロ波帯で報告されていた。テラヘルツ波帯では、マイクロ波帯と比較して構造が微細となるため、分割リング共振器を用いることは作製上難しい。そのため、テラヘルツ波帯では、H構造[1]や十字構造[2]を配置したメタアトムが報告されていたが、低損失な負の屈折率材料は報告されていなかった。

2. 研究の目的

メタ材料をテラヘルツ波帯の光学コンポーネントの材料として用いる際、損失の低減が課題である。そこで本研究では、テラヘルツ波帯で低損失な負の屈折率材料を実現した。非対称なペアカット金属ワイヤー構造により誘電性と磁性による共振周波数を共に制御した。素子の作製は、誘電体損失の小さいシクロオレフィンポリマーを用い、エッチングにより行った。テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)で負の屈折率を確認した。

3. 研究の方法

表裏の金属ワイヤーの位置が一致する対象構造[3,4]では、誘電性の共振周波数が磁性の共振周波数より高くなる。非対称構造では、その誘電性と磁性の共振周波数を一致させることができる。対称と非対称なペアカット金属ワイヤー構造での、誘電性と磁性の共振の物理的振る舞いの違いは図1のように等価回路で考察できる。

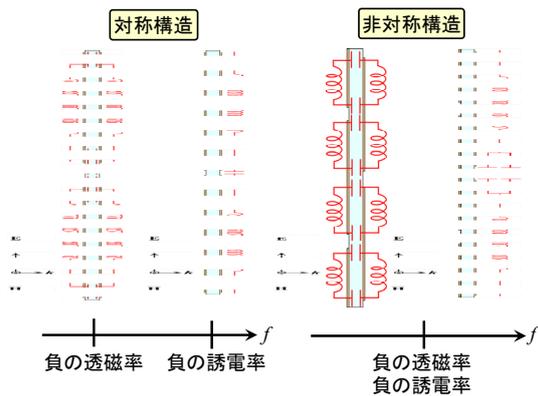


図1 動作原理

誘電性の共振周波数は、対称構造ではワイヤー自体の有するインダクタンス成分とy軸方向のギャップ部でのキャパシタンス成分により決定される。表裏のワイヤーを電界方向に非対称とすることで、ギャップ部のキャパシタンス成分が並列寄与として増加し、誘電性の共振周波数が減少する。

一方、磁性の共振周波数は、対称構造では

表裏のワイヤーによるコイル動作でのインダクタンス成分と表裏のワイヤーでのコンデンサ動作でのキャパシタンス成分により決定される。表裏のワイヤーをy軸方向に非対称とすることで、半分の長さの表裏ワイヤーによるコイル動作、半分の長さのコンデンサ動作と模擬でき、インダクタンス成分とキャパシタンス成分がともに減少し、磁性の共振周波数が増加する。以上のようにして、図2の通り、誘電性と磁性の共振周波数が重なり合う。

図3に金属非対称ペアカットワイヤー構造の解析モデルを示す。実モデルはx、y軸方向で周期構造である。外部に周期境界壁を仮想し、1周期分を抜き出している。実効的な光学定数は散乱行列より導出できる[5]。

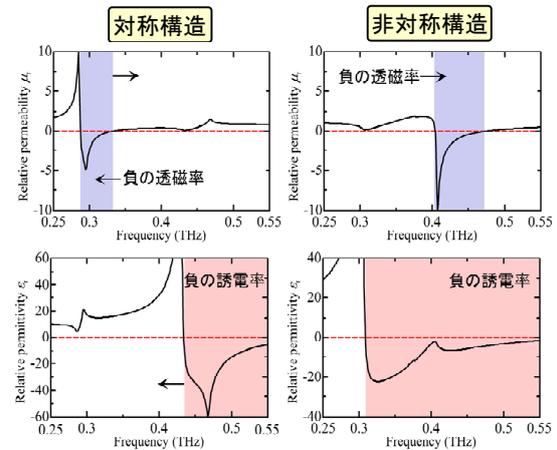


図2 誘電性と磁性の共振

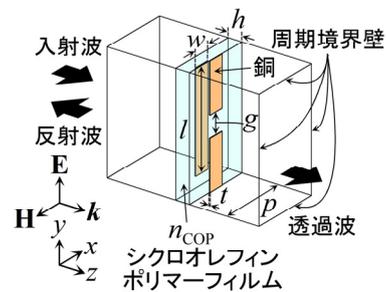


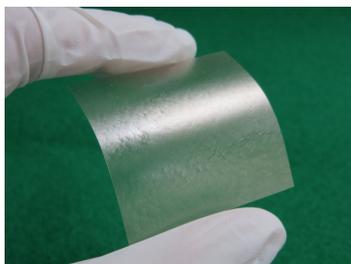
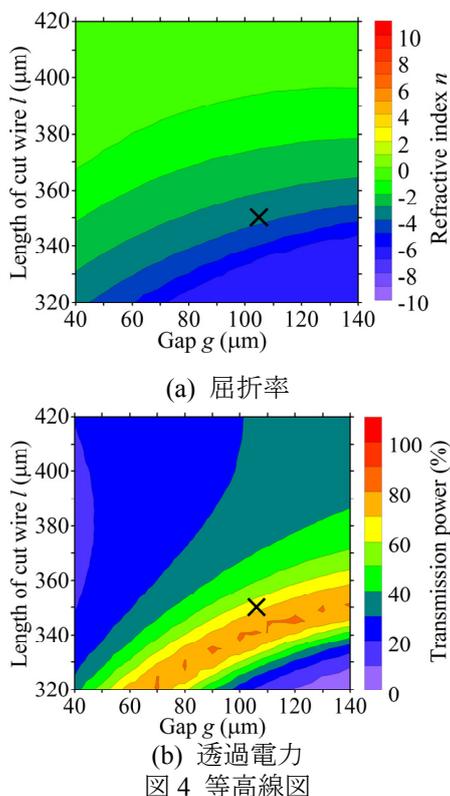
図3 解析モデル

4. 研究成果

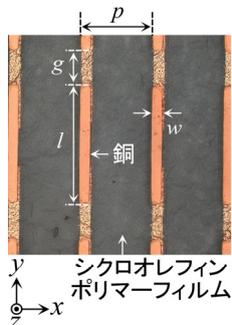
図4に屈折率と透過電力の等高線図を示す。設計周波数は0.42 THzである。金属カットワイヤーのギャップgと長さlを変化させ、負の屈折率、高透過を実現するパラメータを実現した。設計パラメータは金属カットワイヤーの長さl=350 μm、幅w=32 μm、y軸方向の金属カットワイヤーの間隔g=105 μm、x軸方向の金属カットワイヤーの間隔p=210 μmである。図4ではXマークのパラメータである。誘電体の厚さh=50 μmで、0.5 THzで屈折率1.53+j0.0012のテラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマーを用いた。表皮厚の2~3倍程度が望ましいことを考慮し、t=0.5 μmとした。

作製は銅を両面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た。図5が作製した構造である。実験にはテラヘルツ時間領域分光(Toptica Photonics社製 TeraFlash)を用いた。実験により 0.42 THz で負の屈折率 $-4.2+j0.17$ 、透過電力 81.5%、反射電力 4.3%、FOM(屈折率の実部/屈折率の虚部)24.2を確認した。本研究成果は2018年4月にOptics Expressに掲載された[雑誌論文②]。



(a) 全体像



(b) 拡大写真

図5 テラヘルツ波帯負の屈折率・高透過・低損失材料

また本研究を通して、テラヘルツ波帯で誘電性と磁性を同時に制御することができる

ようになった。これによりゼロ屈折率・低反射材料無反射材料や屈折率が10を超える超高屈折率・低反射材料などの極限屈折率材料を生み出すに至った。極限屈折率材料には2017年4月に平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞が贈られた。これらの内容は2017年10月号の応用物理に掲載された。また本研究費の支援により18件の査読付き論文誌を執筆した。2018年8月に韓国で開催される国際会議の招待講演で一連の研究成果を発表する。現在、光源、受光部、光学コンポーネント、アプリケーションへの本テラヘルツ波帯材料の積極的な導入を意図して、研究試料の提供も開始している。  
([http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/material\\_distribution.html](http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/material_distribution.html))

#### 参考文献

- [1] M. Awad et al., Opt. Lett., vol.33, no.22, pp.2683-2685, Nov. 2008.
- [2] O. Paul et al., Opt. Express, vol.16, no.9, pp.6736-6744, April. 2008.
- [3] B. Kanté et al., Phys. Rev. B, vol.79, no.7, pp.075121-1-075121-4, Feb. 2009.
- [4] H. Kubo et al., IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no.10, pp.1658-1661, Oct. 2012.
- [5] X. Chen et al., Phys. Rev. E, vol.70, no.1, pp.016608-1-016608-7, July. 2004.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計18件)

① Takehito Suzuki and Satoshi Kondoh, “Negative Refractive Index Metasurface in the 2.0-THz Band,” Optical Materials Express, 査読有, 2018. (印刷中)

② Takehito Suzuki, Masashi Sekiya, Tatsuya Sato, and Yuki Takebayashi, “Negative Refractive Index Metamaterial with High Transmission, Low Reflection, and Low Loss in the Terahertz Waveband,” Optics Express, 査読有, vol.26, no.7, pp.8314-8324, Apr. 2018. DOI:10.1364/OE.26.008314

③ 鈴木 健仁, “極限屈折率材料の探索とテラヘルツ波帯への応用,” 応用物理, 閲読有, vol.86, no.10, pp.897-902, Oct. 2017. <https://www.jsap.or.jp/ap/2017/10/ob860897.html>

④ Koki Ishihara and Takehito Suzuki, “Metamaterial Demonstrate Both a High Refractive Index and Extremely Low Reflection in the 0.3-THz band,” Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, vol.38, no.9, pp.1130-1139, Sep. 2017. DOI:10.1007/s10762-017-0416-8

- ⑤ 鈴木 健仁, “メタマテリアルでテラヘルツ波帯の光学素子を作る,” 電気学会誌, 閲読有, vol.137, no.6, pp.350-353, Jun 2017.  
DOI:10.1541/ieejjournal.137.350
- ⑥ 大内 隆嗣, 石原 功基, 佐藤 竜也, 富樫 隆久, 鈴木 健仁, “高屈折率低反射メタマテリアルを活用した薄フィルム分布屈折率コリメートレンズの設計,” 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, vol.J100-B, no.3, pp.235-244, Mar. 2017.  
DOI: 10.14923/transcomj.2016JBP3027
- ⑦ Takehito Suzuki, Tatsuya Kimura, Takahisa Togashi, Hideaki Kitahara, Koki Ishihara, Tatsuya Sato, “Terahertz Epsilon-near-zero Cut-through Metal-Slit Array Antenna,” Applied Physics A, 査読有, vol.123, no.2, pp.139-144, Feb. 2017.  
DOI:10.1007/s00339-016-0714-3
- ⑧ 鈴木 健仁, 石原 功基, 大内 隆嗣, “高屈折率・極低反射・低損失なテラヘルツメタマテリアルを実現—産業応用化に向け、テラヘルツデバイスの超小形化・省エネ化へ貢献—,” 電子情報通信学会誌, 閲読有, vol.99, no.2, pp.159-160, Feb. 2016.
- ⑨ 鈴木 健仁, 大内 隆嗣, 石原 功基, 佐藤 竜也, 富樫 隆久, 古謝 望, “高屈折率極低反射メタマテリアルによる 0.3 THz 帯分布屈折率レンズの提案と設計,” レーザー研究, 査読有, vol.44, no.2, pp.116-120, Feb. 2016. (レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会における招待講演による論文)
- ⑩ Takehito Suzuki, Masaya Nagai, and Yudai Kishi, “Extreme-Sensitivity Terahertz Polarizer Inspired by an Anisotropic Cut-through Metamaterial,” Optics Letters, 査読有, vol.41, no.2, pp.325-328, Jan. 2016  
DOI:10.1364/OL.41.000325
- ⑪ 岸 湧大, 鈴木 健仁, “分割リング共振器を装加した金属スリットアレーによるテラヘルツ波帯での負の屈折率設計,” 電気学会論文誌 E, 査読有, vol.135, no.11, pp.460-465, Nov. 2015.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.460
- ⑫ 石原 功基, 岸 湧大, 鈴木 健仁, “3 次元金属マイクロコイルを装加した金属スリットアレーによるテラヘルツ波帯での負の屈折率設計,” 電気学会論文誌 E, 査読有, vol.135, no.11, pp.466-473, Nov. 2015.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.466
- ⑬ 竹林 佑記, 富樫 隆久, 鈴木 健仁, “金属非対称ペアカットワイヤーによるテラヘルツ波帯での負の屈折率構造の高周波数化の検討,” 電気学会論文誌 E, 査読有, vol.135, no.11, pp.476-477, Nov. 2015.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.476
- ⑭ 鈴木 健仁, 大内 隆嗣, 古謝 望, 石原 功基, “フレキシブル薄フィルム上 2 層構造カットワイヤーによるテラヘルツ波用大口径 1/4 波長板の設計と評価,” 電気学会論文誌 E, 査読有, vol.135, no.11, pp.478-479, Nov. 2015.  
DOI:10.1541/ieejsmas.135.478
- ⑮ Nozomu Koja, John C. Young, and Takehito Suzuki, “Quasi-three Dimensional Post Array for Propagation and Focusing of a Terahertz Spoof Surface Plasmon-Polariton,” Applied Physics A, 査読有, vol.120, no.2, pp.479-485, June 2015  
DOI:10.1007/s00339-015-9259-0
- ⑯ Yudai Kishi, Masaya Nagai, John C. Young, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, and Takehito Suzuki, “Terahertz Laminated-structure Polarizer with High Extinction Ratio and Transmission Power,” Applied Physics Express, 査読有, vol.8, no.3, pp.032201-1-4, Feb. 2015.  
DOI:10.7567/APEX.8.032201
- ⑰ Takahisa Togashi, Hideaki Kitahara, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, Mamoru Mita, John C. Young, and Takehito Suzuki, “Terahertz Path-Length Lens Composed of Oblique Metal Slit Array,” Applied Physics A, 査読有, vol.118, no.2, pp.397-402, Feb. 2015.  
DOI:10.1007/s00339-014-8918-x
- ⑱ Katsunari Irie, Keisuke Takano, John C. Young, Kohji Yamamoto, Masahiko Tani, and Takehito Suzuki, “Spectral Characteristics of Photoconductive Dipole Antennas that Include Photocurrent and Receiving Antenna Effects,” Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation, 査読有, vol.1, no.1, pp.20-24, Jan. 2015.  
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380246
- [学会発表] (計 33 件)
- ① 関谷 允志, 鈴木 健仁, “0.3THz 帯両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの短焦点化の検討,” 20a-A402-9, 2018 年第 65 回応用物理学春季学術講演会, 早稲田大学, Mar. 2018.
- ② 近藤 諭, 鈴木 健仁, “3.0THz 帯両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナ,” 20a-A402-8, 2018 年第 65 回応用物理学春季学術講演会, 早稲田大学, Mar. 2018
- ③ 近藤 諭, 鈴木 健仁, “負の屈折率 2.0 THz 帯メタマテリアルの金属ナノ粒子インク塗布フィルムを用いた試作,” 6A1-1, 第 32 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 東

京理科大学, Mar. 2018

④ Kazuhisa Watai, Koki Ishihara, Satoshi Kondoh, Tatsuya Sato, Makoto Shijo, Takehito Suzuki, “Terahertz Metamaterial to Demonstrate Extremely Wide Range of Effective Refractive Indices in the 0.3-THz Band,” IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, TH-A5.1A.10, July 9-14 2017.

⑤ 渡井 和央, 石原 功基, 近藤 諭, 佐藤 竜也, 司城 誠, 鈴木 健仁, “同一種類のメタアトムによる 0.3THz 帯の高・ゼロ・負の屈折率の実現,” 2017 年第 64 回応用物理学春季学術講演会, 14a-211-4, パシフィコ横浜, Mar. 2017.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: シート型メタマテリアルおよびシート型レンズ

発明者: 鈴木 健仁

権利者: 茨城大学

種類: 特許

番号: 特開 2017-157975

PCT 出願 (PCT/JP2017/4381)

出願年月日: 2016 年 2 月 29 日

国内外の別: 国内・国外

名称: シート型メタマテリアルおよびシート型レンズ

発明者: 鈴木 健仁

権利者: 茨城大学

種類: 特許

番号: 特開 2017-034584,

PCT 出願 (PCT/JP2016/70978)

出願年月日: 2015 年 8 月 5 日

国内外の別: 国内・国外

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 健仁 (SUZUKI, Takehito)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 60550506