

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600108

研究課題名(和文)-60dB高消光比・90%高透過率・堅牢・低コストなテラヘルツワイヤーグリッド

研究課題名(英文) Terahertz polarizer with high extinction ratios below -60 dB, transmission power above 90%, robustness, and a low-cost structure.

研究代表者

鈴木 健仁 (SUZUKI, TAKEHITO)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：60550506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波を活用した計測により新たな物理現象が観測される中、偏光計測のための極めて高感度なテラヘルツ波帯偏光子が求められていた。しかしながら、従来のワイヤーグリッド構造の偏光子の場合、高消光比、高透過電力、高堅牢性の全てを両立はできていなかった。研究代表者らは、高消光比、高透過電力、高堅牢性の全てを両立した金属スリットアレイ構造によるテラヘルツ波帯偏光子を実現した。設計には繰り返し補正に耐えうる高速なモードマッチング法を用いた。作製可能な条件も考慮し、素子を作製し、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)により実験評価した。

研究成果の概要(英文)：Measurements utilizing terahertz waves have found and observed novel physical phenomena. High-sensitivity terahertz polarizers are demanded for accurate-polarization measurements. However, conventional wire-grid polarizers cannot simultaneously realize a high extinction ratio, high transmission power, and robustness. We demonstrate a laminated-structure polarizer with a high extinction ratio, high transmission power, and robustness. The design is performed by a mode-matching method for an iterative design, taking into fabrication conditions. Measurements by terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) confirm the performance of fabricate polarizers.

研究分野：応用物理学・工学

キーワード：テラヘルツ波帯 偏光子 金属スリット構造 メタマテリアル モードマッチング法 散乱行列

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波を活用した計測により新たな物理現象が観測される中、偏光計測のための極めて高感度なテラヘルツ波帯偏光子が求められていた。しかしながら、従来のワイヤグリッド構造の偏光子の場合、高消光比、高透過電力、高堅牢性の全てを両立はできていなかった。従来のワイヤグリッド構造では、ワイヤを太くすることで、消光比を高く実現できるが、透過電力は低くなってしまふ。一方、ワイヤを細くすることで、透過電力を高く実現できるが、消光比は低くなってしまふ。さらに従来のワイヤグリッド構造は異常に壊れやすいという問題もあった。

2. 研究の目的

研究代表者らは、-50 dB 消光比、80% 透過電力、高堅牢性の全てを両立した金属スリットアレー構造による偏光子 GoIS[®]を実現した。高速なモードマッチング法を用い、金属スリットアレー構造偏光子の設計法を構築した。金属スリット内にフィルムを挿入したフィルム構造、フィルムの誘電体損失を除去するための中空構造それぞれで、消光比、透過電力を最適化設計した。作製可能な条件も考慮し、素子を作製し、実験評価した。

3. 研究の方法

図1(a)にフィルム構造、図2(a)に中空構造の偏光子を示す。構造は波長に対して十分大きく、 x 軸は周期構造、 y 軸方向は無限一様構造である。図3のように外部に周期境界壁を仮想し、一本分抜き出した2次元解析モデルとして表現できる。

金属壁と周期境界壁の1つ目のステップ構造をモードマッチング法で解析し、図3のように距離 a で散乱行列を接続する。入射波は金属壁側から入射する TEM モードである。磁界 \mathbf{H} の入射波 \mathbf{H}_i 、反射波 \mathbf{H}_r 、透過波 \mathbf{H}_t はそれぞれ

$$\mathbf{H}_i = \hat{y} \exp(-jk_0 z)$$

$$\mathbf{H}_r = \hat{y} \sum_{m=0}^{\infty} A_m I_m \exp(+j\sqrt{k_0^2 - (m\pi/d)^2} \cdot z)$$

$$\mathbf{H}_t = \hat{y} \sum_{n=1}^{\infty} B_n I_n \exp(-j\sqrt{k_0^2 - (2n\pi/p)^2} \cdot z) + \hat{y} \sum_{l=0}^{\infty} C_l I_l \exp(-j\sqrt{k_0^2 - (2l\pi/p)^2} \cdot z)$$

とおける。ここで、 I_m 、 I_n 、 I_l は基底関数を表し、 $I_m = \cos(m\pi x/d)$ 、 $I_n = \sin(2n\pi x/p)$ 、 $I_l = \cos(2l\pi x/p)$ と表せる。 A_m 、 B_n 、 C_l は励振係数を表す。電界 \mathbf{E} は磁界 \mathbf{H} より一意に決まる。開口面上で電界と磁界の境界条件を立てる。境界条件に、3種類の基底関数を重み付けのためそれぞれかけ、境界面上で積分し、行列式を導出する。この行列式を解くことで、励振係数が求まる。自由空間側から入射する TEM モードの場合の励振係

数 D_n 、 E_n 、 F_u もモードマッチング法により求められる。

1つ目のステップ構造の散乱行列は励振係数より導出できる。2つ目の散乱行列と距離 a で接続し、図3の全体構造での TM モードを入射した際の透過、反射特性が求まる。

フィルム構造では、金属の厚み $t = 0.5 \mu\text{m}$ 、伝搬方向の金属の長さ $a = 1.0 \text{ mm}$ 、金属スリット間隔 $d = 50 \mu\text{m}$ である。0.2 ~ 1.95 THz で -50 dB 以下の消光比、TM モードの透過電力の平均値 85% (電界強度で 92%) を設計した。

中空構造では、金属の厚み $t = 20 \mu\text{m}$ 、伝搬方向の金属の長さ $a = 2.0 \text{ mm}$ 、金属スリット間隔 $d = 50 \mu\text{m}$ である。0.3 ~ 2.99 THz で -50 dB 以下の消光比、TM モードの透過電力の平均値 94% (電界強度で 97%) を設計した。

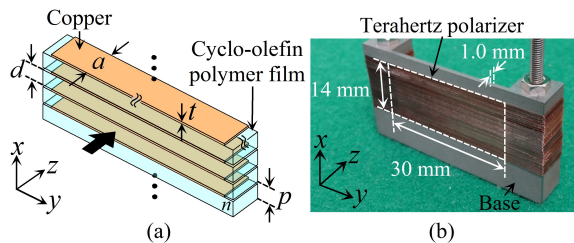


図1 (a) 設計したフィルム構造偏光子

(b) 作製したフィルム構造偏光子

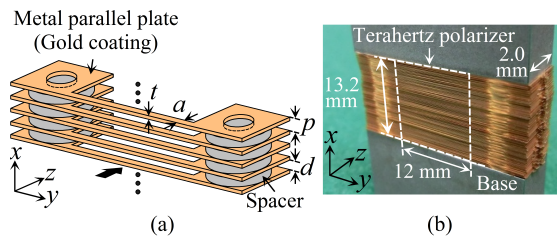


図2 (a) 設計した中空構造偏光子

(b) 作製した中空構造偏光子

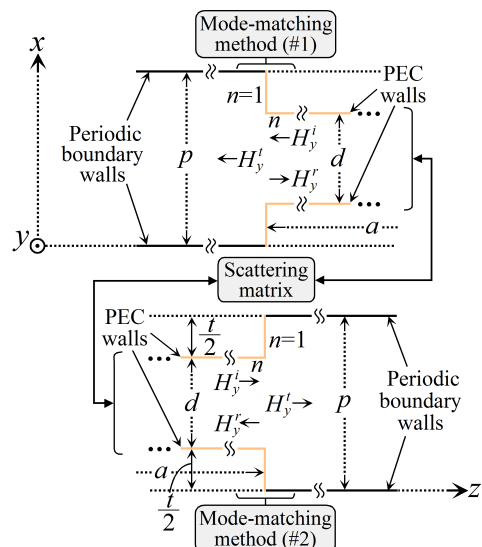


図3 モードマッチング法での解析モデル

4. 研究成果

図 1(b)に作製したフィルム構造の偏光子を示す。銅を成膜したシクロオレフィンポリマーフィルムを抜き加工し、作製している。従来の素子に比べて極めて堅牢である。

図 4 に実験結果を示す。0.28 ~ 1.09 THz で消光比は-50 dB 以下に保っている。0.2 ~ 1.95 THz での TM モードの透過電力の平均値は 76% (電界強度で 87%) である。

図 2(b)に作製した中空構造の偏光子を示す。平行平板とスペーサーはエッチングにより作製している。非常に堅牢である。導体損を抑えるため、平行平板表面は金めっきを施している。

図 4 に実験結果を示す。0.4 ~ 1.1 THz で消光比は-50 dB 以下を保っている。設計に比べて消光比が悪化している原因の 1 つとして、平行平板のたわみなどの積層誤差が考えられる。また高周波での消光比の悪化の原因は、カットオフ周波数に近づいていることや測定ダイナミックレンジの制限によるものと考えられる。測定系の制限より 2.7 THz までの結果を載せている。0.3 ~ 2.7 THz での TM モードの透過電力の平均値は 78% (電界強度で 88%) である。反射抑圧はおおむねできている。

表 1 に今回設計したフィルム構造、中空構造の偏光子と、従来のワイヤグリッド構造の偏光子との性能の比較を示す。

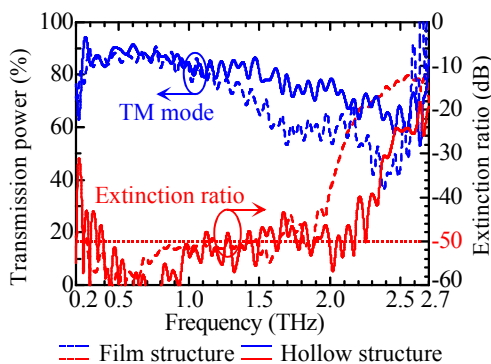


図 4 実験結果

表 1 透過電力と消光比の比較

		フィルム構造	中空構造	従来製品 ワイヤーの 直径:10 μm 周期:35 μm
消光比	<-50 dB	0.28 ~ 1.09 THz	0.4 ~ 1.1 THz	実現不可
	<-40 dB	0.2 ~ 1.98 THz	0.3 ~ 2.2 THz	~ 1.0 THz
平均透過電力	76% (電場:87%)	78% (電場:88%)	99% (電場:99%)	
堅牢性	高い	高い	壊れやすい	

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 14 件)

鈴木 健仁, “メタ材料でテラヘル

ツ波帯の光学素子を作る,” 電気学会誌, vol.137, no.6, pp.350-353, Jun 2017. 解説
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejournal/-char/ja/>

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, vol.123, no.2, pp.139-144, Feb.2017. 査読有
DOI: 10.1007/s00339-016-0714-3

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材料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, vol.J100-B, no.3, Mar. 2017. 査読有
DOI:10.14923/transcomj.2016JBP3027

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材料による 0.3 THz 帯分布屈折率レンズの提案と設計,” レーザー研究, 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) 査読有

Takehito Suzuki, Masaya Nagai, and Yudai Kishi, “Extreme-Sensitivity Terahertz Polarizer Inspired by an Anisotropic Cut-through Metamaterial,” Optics Letters, vol.41, no.2, pp.325-328, Jan. 2016. (published online 11 Decemeber 2015) 査読有
DOI: 10.1364/OL.41.000325

岸 湧大, 鈴木 健仁, “分割リング共振器を装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, vol.135, no.11, pp.460-465, Nov. 2015. 査読有
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.460

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, vol.135, no.11, pp.466-473, Nov. 2015. 査読有
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.466

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, vol.135, no.11, pp.476-477, Nov. 2015. 査読有

DOI: 10.1541/ieejsmas.135.476

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, vol.135, no.11, pp.478-479, Nov. 2015. 査読有

DOI: 10.1541/ieejsmas.135.478

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, vol.120, no.2, pp.479-485, June 2015. 査読有

DOI: 10.1007/s00339-015-9259-0

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, vol.8, no.3, pp.032201-1-4, Feb. 2015. 査読有

DOI: 10.7567/APEX.8.032201

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, vol.118, no.2, pp.397-402, Feb. 2015. 査読有

DOI: 10.1007/s00339-014-8918-x

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, vol.1, no.1, pp.20-24, Jan. 2015. 査読有

DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380246

〔学会発表〕(計 25 件)

鈴木 健仁, “Terahertz Metamaterials,” 日本学術振興会メタマテリアル187委員会, 機械振興会館, Dec. 2016. (招待講演)

Koki Ishihara and Takehito Suzuki, “Transparent Metamaterial with Extremely High Refractive Index for Terahertz Applications,” EMN Meeting on Photonics, Barcelona, Spain, Sep. 21, 2016. (招待講演)

Takehito Suzuki, “Terahertz Component Platforms Inspired by Metamaterials,” The 5th Advanced Lasers and Photon Sources Conference, ALPS9-2, Yokohama, Japan, May 2016. (招待講演)

鈴木 健仁, “メタマテリアルによるテラヘルツ波高機能制御のための光学素子・アンテナの研究開発 - 損失との闘い -,” 平成 27 年電気学会全国大会, S29-2, 東京都市大学(東京都), Mar. 24, 2015. (招待講演)

Yudai Kishi, Masaya Nagai, Mamoru Mita, John C. Young, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, and Takehito Suzuki, “Terahertz Polarizer Consisting of Laminated Hollow Structure with High Extinction Ratio and Transmission Power,” Optical Terahertz Science & Technology Conference 2015, Poster Session 3-22, San Diego(USA), Mar. 7, 2015.

鈴木 健仁, “メタマテリアルによるテラヘルツ波高機能制御のための光学素子・アンテナの研究,” レーザー学会第35回年次大会, 東海大学, Jan. 2015.

岸 湧大, 永井 正也, 御田 護, 高野 恵介, 萩行 正憲, 鈴木 健仁, “-50 dB 以下の高消光比と 80 %以上の高透過電力を両立設計したテラヘルツ波帯ワイヤーグリッドの実験評価,” 2014 年秋季 第75回 応用物理学関係連合講演会, 19p-C6-10, 北海道大学(北海道札幌市), Sep. 19, 2014.

〔図書〕(計 2 件)

鈴木 健仁, “テラヘルツ光領域で屈折率ゼロの透明物質を実現,” セラミックス, 日本セラミックス協会, vol.51, no.10, pp.718, Oct. 2016.

鈴木 健仁, “メタマテリアルによる光学素子・アンテナの研究開発動向,” 光ライアンス, 日本工業出版株式会社, 2015 年 1 月号, pp.23-27, Jan. 2015.

〔その他〕

ホームページ等

<http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健仁 (Suzuki Takehito)
茨城大学・工学部・講師
研究者番号: 60550506

(4) 研究協力者

岸 湧大 (Kishi Yudai)
茨城大学・理工学研究科・修士課程修了