

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26706008

研究課題名(和文)円偏光可変スパイラルメタマテリアルによるTHz偏光変調フィルタ

研究課題名(英文)THz Spiral Metamaterial for Active Polarization Modulation

研究代表者

菅 哲朗(Tetsuo, Kan)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：30504815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、テラヘルツ光の偏光状態を右円偏光と左円偏光に切り替えられる円偏光スイッチング素子の実現に取り組んだ。偏光状態を動的に切り替えられれば、分光を行う際の測定精度が向上し、より細かな情報を得られると期待されている。しかしながら、これまではテラヘルツ光の偏光状態を切り替えられる簡便なデバイスが存在しておらず、それがテラヘルツ光の偏光を活用した技術の開発を妨げていた。そこで本研究では、直径150ミクロンの変形可能な金属の渦巻き構造を縦横に多数配列したメタマテリアルと呼ばれる人工材料を作り、テラヘルツ光の偏光状態を動的に切り替えられる光学デバイスを実現した。

研究成果の概要(英文)：I have developed an active polarization filter which is able to switch the polarization state of the transmission light between the right and left circularly polarizations in terahertz (THz) frequency region where the wavelength is several hundred micrometer. Utilization of the polarization light, which presents an aligned oscillating electric field, enables us to obtain detailed material information at spectroscopic measurement. Moreover, dynamic switching of the polarizations provides further precise measurement. There has however been no active filter to switch the polarization states in THz region. I developed a THz metamaterial device to switch polarization states of the THz wave dynamically. The metamaterial is composed of array of reconfigurable metal spirals, which are 150- μm in diameter using Micro electro mechanical systems (MEMS) technology.

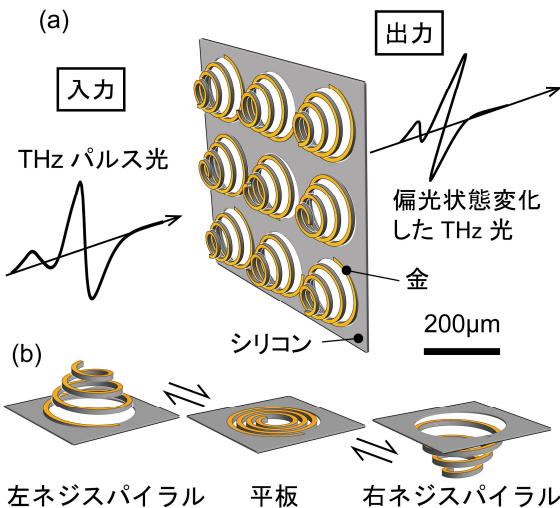
研究分野：MEMS

キーワード：メタマテリアル テラヘルツ光 可変偏光フィルタ MEMS

1. 研究開始当初の背景

偏光変調フィルタは、科学分析の分野で非常に重要であり、分光分析装置に欠かせないものである。可視光～遠赤外の領域では、PEM (Photoelastic Modulator: 光弾性変調器) と呼ばれる、応力により複屈折を呈する石英や Si などの材料を利用して実現されている。これを用いて、入射直線偏光から左右の円偏光を含む複数の偏光状態を構成し、物質の偏光依存性を持つ分光スペクトルが得られてきた。ところが、波長が遠赤外光よりも長い、数 100 μm のテラヘルツ (THz) 帯では、十分な光弾性を示す材料がなく、PEM 相当の装置が存在しない。THz 帯はいわゆる分子指紋と呼ばれる数多くの化学物質の振動モードの周波数と重なっており、THz 帯で円偏光を用いれば、物質の立体構造を反映したスペクトルが取得できるため、THz 偏光変調フィルタの実現が切望されてきた。さらに、THz 検出器の開発が近年急ピッチで進んでおり、偏光変調フィルタと組み合わせられれば、簡便かつ高感度な分光システムが構築可能である。

THz 帯における偏光コントロールの方法として、近年メタマテリアルと呼ばれる人工的な光学材料を利用した方法が注目されている。メタマテリアルは、光の波長よりも小さい人工的な光学共鳴構造を作り、任意の誘電率や透磁率などを実現する方法である。特に、キラリティを持つメタマテリアルは、光学活性と呼ばれる左右両方の円偏光の透過性を制御できるので、光の偏光状態を任意に変える偏光変調フィルタを作ることができる可能性を持つ。ただし、一方のキラリティは、左右どちらかの円偏光成分のみの変調能力しか持ちえない。互いに独立な固有成分である左右両方の円偏光成分とのインタラクションを行い、完全な偏光変調フィルタを THz 帯で実現するには、キラリティの切り替えができる可変メタマテリアルが必要であった。



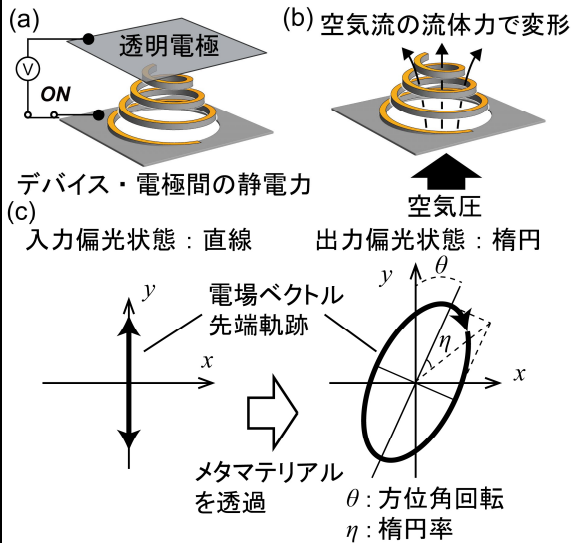
2. 研究の目的

本研究では、これまでテラヘルツ帯に存在しなかった、偏光変調フィルタの実現を目的とする。そのために、スパイラルの金属構造が右ネジ巻きか左ネジ巻きかのキラリティに応じて、左もしくは右円偏光との選択的な共鳴性を持つことを生かし、テラヘルツ (THz) 帯円偏光メタマテリアルを提案する。平面スパイラルの上下の機械変形方向の選択により、立体構造のキラリティを左右切り替え可能なので、一つのデバイスで左右両方の円偏光と共鳴し、円偏光分光に適用できる偏光変調フィルタを実現可能となる。最終的に、提案したデバイスを用いて THz 帯円偏光分光システムを構築し、アミノ酸などキラリティを持つ分子の分光への適用性を検証する。

申請者は、これまで MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) による、THz 帯の円偏光メタマテリアルの研究を進めてきた。図 1(a) に示すように、直径約 150 μm の金のスパイラル構造を Si 基板上にアレイ配置する。スパイラルがフラットな状態(図 1(b)中央)では、この構造は光学活性を持たないが、スパイラル構造を上側に変形させて立体スパイラル構造とすると(図 1(b)左)、キラリティに対応した光学活性を示すことがわかった。その過程で、同じスパイラル構造を、逆方向の下側に変形させると(図 1(b)右)、先ほどの立体スパイラルと鏡像関係にある逆のキラリティのスパイラル構造を実現できるという着想を得た。これは、鏡像が有する対称性により、同じ周波数の光に対し、左右両方の円偏光透過性をコントロールできる、前例のない THz 帯偏光変調フィルタへの展開といえる。本研究は、MEMS 構造による、キラリティ切り替えを実現する新しい可変メタマテリアルと位置付けることができる。

3. 研究の方法

メタマテリアルのアプローチにより、円偏



光による THz 分光計測を可能にする偏光変調フィルタを実現することが本提案の最終ゴールである。そのために、MEMS による機械的に変形可能なメタ材料を構成する。駆動方法は図 2(a)(b)のように、静電駆動と空気圧駆動の 2 方法を候補とした。以下、偏光変調の達成目標について簡単に説明する。図 2(c)に示すように偏光素子に線偏光を入射すると、出力偏光の状態は一般に楕円偏光となる。その時の楕円の形状は、方位角 θ と楕円角 η の 2 つの指標で記述できる。このうち、 η が $\pm 45^\circ$ のとき偏光状態は真円を描くので、出力光は純粋な左右円偏光となる。つまり、楕円率の可動範囲が $-45 \sim 45^\circ$ にできれば線偏光から円偏光のみ取り出せるので、偏光変調フィルタを構成可能となる。そこで、楕円率 $\pm 45^\circ$ の達成を本提案の目標として取り組む。以上により、偏光変調フィルタを実現する。

4. 研究成果

まず、デバイスの構成について説明する。MEMS メタ材料はトップ層厚さが 300 nm の SOI (Silicon on Insulator) を用いて製作した。MEMS 加工により、約 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ の面積を持つ厚さ 300 nm のシリコン自立薄膜に直径 $150 \mu\text{m}$ 、ビーム幅 $6 \mu\text{m}$ 、5 巻の平面渦巻き構造をアレイピッチ (渦巻き構造の中心間距離) $170 \mu\text{m}$ で敷き詰めた構造である

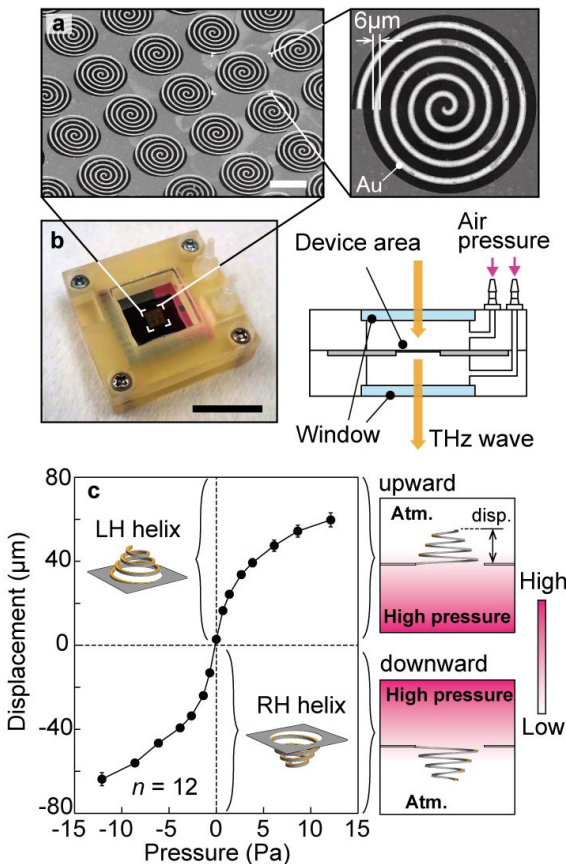


Figure-2 Shimoyama

図 3 デバイス像と空気圧駆動特性

(図 3(a))。当初、電圧を印加して変形を実現していたが、静電力を用いた場合には、らせん構造を基板面から沈み込む方向に変形させてキラリティ切り替えを実現することが困難であることが判明した。これは、印加する静電場が、シリコン基板によって遮蔽されて、下側変形に十分な駆動力が得られないためと考えられる。また、回転角度の変調量が 5° 程度であり、変調量の増大も課題であった。そこで、新たな駆動方法として、静電遮蔽効果に左右されず、また、光学特性に影響を与えない駆動方法として、空気圧による変形方法を用いた。

空気圧を印加するために、図 3(b)に示すチャンバを 3D プリンタにより試作した。チャンバの構造材料はアクリルであるが、窓部分

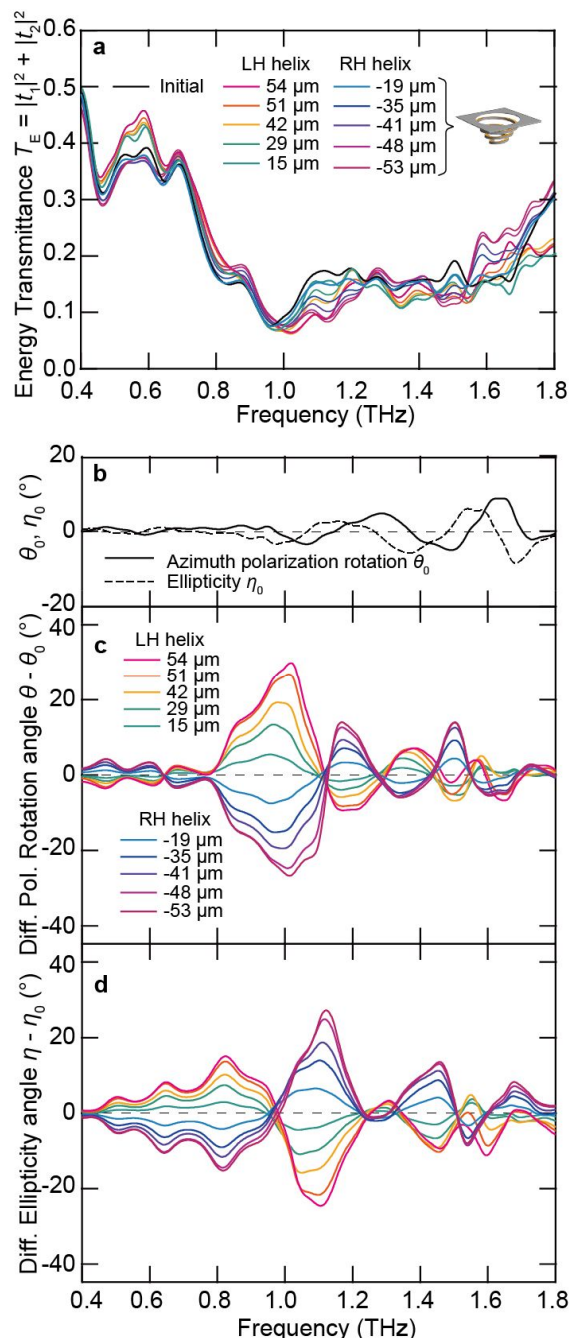


図 4 THz 透過特性と偏光変調特性

には THz を透過するポリマー窓材を利用している。断面図に二つある空気ポートのどちらに空気圧を印加するかによって、基板から上側方向への変形と下側方向への変形を選択できるようにしている。このセットアップを用いて、窒素の印加圧力とらせん構造の中心部分の変形量の関係をプロットしたのが図 3(c)である。0 Pa を中心に、上下方向の変形がおおむね対称的に生じていることが分かり、キラリ切り替えが実現可能であることが判明した。また、約 10 Pa の圧力印加に対して、約 70 μm と、静電力と比較して倍程度の大きな変形量が得られた。

らせん構造の光学特性を THz-TDS を用いて計測したところ、透過率はほぼ変形状態によらないことがわかり、1 THz 近傍で約 10% であった(図 4(a))。偏光特性を計測したところ、構造の変形方向が上方向か下方向かに応じて、透過光の方位角回転角度、および、楕円率角透過が正負異なる方向に変化する傾向を示した(図 4(c)、(d))。このとき、共鳴点の位置は変形方向によらず一定なので、キラリ切り替えを対称性良く実現できたことが確認できた。このような対称性のよい円偏光制御をテラヘルツ光で実現したデバイスはこれまでになく、大きな達成といえる。また、このときに得られた偏光変化の大きさは、分光に適用可能な、十分な大きさのものであり、静電力駆動で抽出された課題を解決できたといえる。

今後は、当初計画していたものの、最終的には達成できなかった分光応用可能性の検証など、実用化を意識した方向に研究を進めていく予定である。

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 2 件)

- [1] **Tetsuo Kan**, Akihiro Isozaki, Natsuki Kanda, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Hidetoshi Takahashi, Makoto Kuwata-Gonokami, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals," *Nature Communications*, vol. 6, article no. 8422, 2015. (査読有)
- [2] Akihiro Isozaki, **Tetsuo Kan**, Hidetoshi Takahashi, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "Out-of-plane Actuation with a Sub-micron Initial Gap for Reconfigurable Terahertz Micro-electro-mechanical Systems Metamaterials," *Optics Express*, vol. 23, issue 20, pp. 26243-26251, 2015. (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

- [1] **菅哲朗**: MEMS キラルメタマテリアル, 日本学術振興会産学協力研究会 メタマテリアル第 187 委員会, 機械振興会館(東京都・港区)(16th, December, 2016) (招待講演)
- [2] **Tetsuo Kan**: Chiral Switable MEMS THz Metamaterial, I-28, The First A3 Metamaterials Forum, 東北大学(宮城県・仙台市)(7th, July, 2016) (Invited)
- [3] **Tetsuo Kan**, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, H. Takahashi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Chiral Switchable Metamaterial with MEMS Reconfigurable Spiral in THz Frequency, CLEO 2016, FTTh3D.8, San Jose (USA), (9th, June, 2016) (査読有)
- [4] **菅哲朗**, 磯崎瑛宏, 神田夏輝, 根本夏紀, 小西邦昭, 五神真, 松本潔, 下山勲: キラリティ切替可能な MEMS スパイラルメタマテリアル THz 応答解析, 20p-H135-3, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学(東京都・目黒区)(20th, March, 2016)
- [5] **菅哲朗**: MEMS メタマテリアルのテラヘルツ偏光応答の検証, E-04, COMSOL CONFERENCE TOKYO 2015, 秋葉原 UDX ビル(東京都・千代田区)(3rd, December, 2015) (招待講演)
- [6] **菅哲朗**: 講義 MEMS の RF 応, 神奈川科学技術アカデミー MEMS デバイスの応用コース, 新川崎・創造のもり(神奈川県・川崎市)(14th, October, 2015) (招待講演)
- [7] **Tetsuo Kan**: Chiral THz tunable metamaterial with MEMS technology, The 5th Korea-Japan Metamaterial Forum, Seoul (Korea) (29th, June, 2015) (invited)
- [8] **菅哲朗**, 磯崎瑛宏, 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 五神真, 松本潔, 下山勲: MEMS 可変スパイラルメタマテリアルのテラヘルツ応答, 13a-A14-2, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県・秦野市)(13th, March, 2015)
- [9] **Tetsuo Kan**, A. Isozaki, H. Takahashi, K. Matsumoto and I. Shimoyama: 3D Structural Fixation Utilizing Tg Transition of A Parylene Film, The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2015), 405-408, Estoril (Portugal) (18th, January, 2015) (査読有)
- [10] **菅哲朗**, 磯崎瑛宏, 神田夏輝, 根本夏紀, 小西邦昭, 五神真, 松本潔, 下山勲: 機械構造変形によるテラヘルツチューナブル MEMS スパイラルメタマテリアル, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 東海大学(東京都・港区)(12th, January, 2015) (招待講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ms.mi.uec.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

菅 哲朗 (KAN, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30504815

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

小西邦昭 (KONISHI, kuniaki)

神田夏輝 (KANDA, Natsuki)