

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03984

研究課題名(和文) MEMS可変共振子アレイによるテラヘルツ光空間変調デバイス

研究課題名(英文) A MEMS Tunable Resonator Array for THz Spatial Modulators

研究代表者

年吉 洋 (TOSHIYOSHI, HIROSHI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：50282603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではMEMS静電駆動機構を用いてTHz光に対する可変バンドパス特性を有する独自のクロススロット形状の透過型フィルタを考案し、電磁界解析によってその可変特性を解析するとともに、実際に金属/絶縁体薄膜の表面マイクロマシニング技術によりデバイスを試作し、その光学特性が解析予想通りに機能することを検証したものであり、これにより将来のTHz光用デジタル可変光学素子の基礎を確立した。

研究成果の概要(英文)：This work presents a novel tunable cross-slot resonator as a digital pixel for spatially modulated THz filter based on the MEMS electrostatic actuation mechanism. The tunable filter performance is theoretically studied by using the electromagnetic wave simulation and experimentally confirmed by performing THz measurement on proof-of-concept device developed by the surface micromachining process.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS THz マイクロマシン テラヘルツ光 メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

これまでのテラヘルツ光関連の研究は、高輝度光源と高感度検出器の開発に重点が置かれてきた。その一方で、多くの誘電体材料を透過するテラヘルツ光には、効率よく光路を制御する屈折材料の選択肢が限られている。このため、テラヘルツ領域での受動光学系には金属鏡面の反射光学系を使用することが多く、光路に折り返しが生じ、光学系が複雑化する難点があった。そこで本研究では世界に先駆けて、テラヘルツ光を自在に走査・収束・フォーカス・拡散・遮断する透過型の可変光学系を、MEMS技術を用いて構築する独創的な研究を実施した。

2. 研究の目的

本研究は「MEMS可変共振子アレイによるテラヘルツ光空間変調デバイス」と題し、MEMS技術を用いてテラヘルツ光可変透過光学フィルタの設計・製作・評価を実施するものである。テラヘルツ光は、近年では非破壊検査機器としての応用が期待されているが、その可能性は単に金属異物等の検出には留まらない。特に、100GHzから10THzの周波数帯では、物質の分子構造によって吸収スペクトルが敏感に変化するため、特定波長の透過率から材料組成の推測が可能である。ただし、同技術の普及には、テラヘルツ光学系の小型化・高機能化が必要であることから、本研究ではテラヘルツ光を空間走査する透過型の変調器(スキャナ、可変レンズ、グレーティング等)をMEMS技術で実現する研究に取り組む。

3. 研究の方法

電磁波に対するLC共振素子として、金属製の環状パターン(インダクタ成分、L)の一部に切れ込み(容量成分、C)を設けたSplit-Ring Resonator (SRR)構造が知られている。また、SRRの一边を100~200μmの寸法で設計すると、そのLC共振によりテラヘルツ光領域のバンドストップ・フィルタとして機能する。国内外の研究により、半導体基板上に製作したSRRに電圧を印加して電極直下の空乏層を制御し、SRRの共振を変調した例が報告されている。

ただし従来研究の多くは、電場、磁場、温度などで基板の固体物性を変調するものであるため、その共振周波数に対する変調効率は高々数%であった。一方、本研究ではSRRのパターンを独自のMEMS静電駆動機構で機械的に駆動して電磁気的な境界条件を制御するため、数十%もの大きな共振周波数のシフト量が得られる。特に本研究では、SRRの一部を印加電圧の静電引力で駆動可能なMEMS可変容量素子に置き換えて、ある周波数におけるテラヘルツ光の透過率を、透過/遮断の2状態で制御するスイッチとして使用する独自の方法を考案・試作し、その特性を評価した。

4. 研究成果

本研究ではこれまでに、金属薄膜材料の表面マイクロマシニング加工技術を用いて図1に示すようなSRR内の中空に吊られた可変容量素子を製作し、外部から印加した電圧の静電引力によって容量を調整することで共振周波数を制御可能な可変SRRのTHz特性計測に成功している。

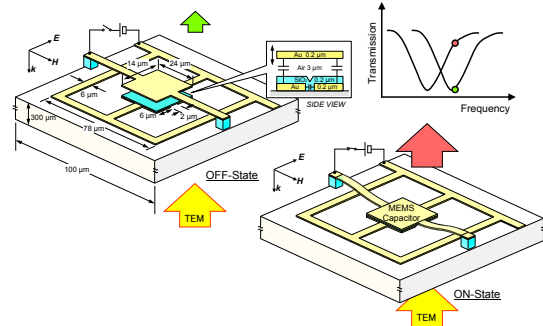


図1 MEMS可変SRR構造

この素子内ではSRR外周の金属パターンをインダクタ、内周の静電ギャップをキャパシタとして、LC共振時には図2に示すような左右対称型の電流分布が得られることが分かっている。とくに注目すべきこととして、SRRパターン上辺では左右のユニットセルと電氣的に接続されているにも関わらず、この部分には貫通電流が流れていない。したがって、この辺は横一列に並んだSRR素子に共通のGND線として利用可能である。一方、SRR内の中空に支持した可動電極もまた横一列に接続されており、これらも共通の上部電極として利用できる。

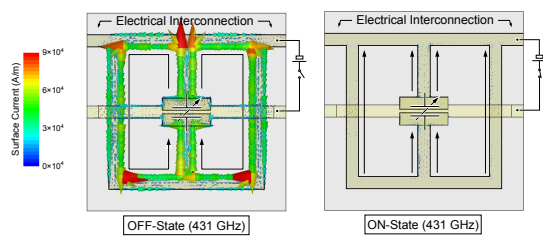


図2 SRR内の電流分布

本研究ではこれらの電極間に電圧を印加して、可動容量を静電引力によってデジタル制御する手法を採用した。このため、単一のSRRでTHz光素子の1ピクセルを構成する訳ではなく、図3に示すように同時に静電駆動可能な縦横5×5程度のサブユニットを構成して、これを1ピクセルとして使用している。本研究では将来的にはこのピクセルのTHz光に対する透過率を0~100%でON/OFF制御することにより空間変調型の可変フィルタを構成し、一定規則のパターンによってTHz光に対するグレーティング、レンズ、プリズム等の機能を持たせることを検討している。また、それらのパターンを時々刻々制

御することにより、THz光の空間スキャナや可変レンズとしての新たな機能創出を目指している。

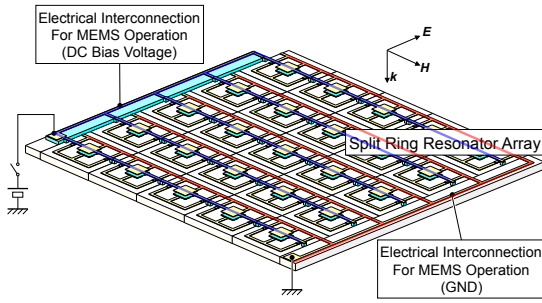


図3 MEM-SRRのグループ化と静電駆動のための配線

表面マイクロマシニングの流れを図4に示す。本研究では、リリース後の完成体電極が上向きに反り上がることを期待して、プロセス中の残留応力に起因する反りを利用した。下部電極構造は、Cr (10 nm)、Au (220 nm)、Cr (10 nm) の積層金属の上に、電気的絶縁としてスパッタ酸化膜200 nmを使用した。また、犠牲層には厚さ2ミクロン程度のフォトリソトを使用した。上部電極には、残留応力を誘起するためにスパッタ酸化膜(240 nm)、Cr (10 nm)、Au (230 nm) の積層膜を使用した。

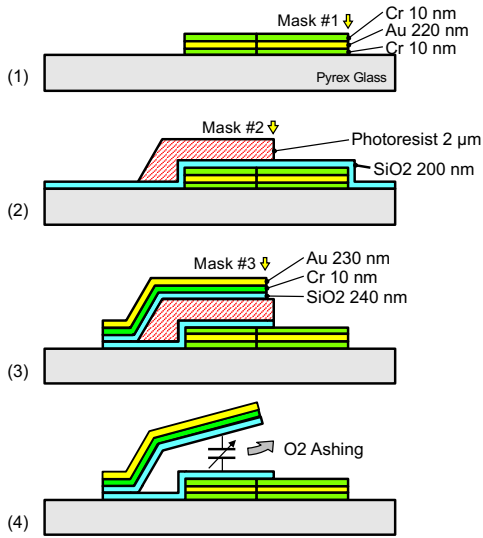


図4 表面マイクロマシニングプロセス

図5に製作したMEMS-SRRのSEM写真を示す。図1の構造図とは異なり、このデバイスではカンチレバー列を可変静電容量として使用している。このため、MEMS-SRRの縦の辺の途中に新たなギャップを入れて、そこを静電駆動のためのDC分離として使用した。

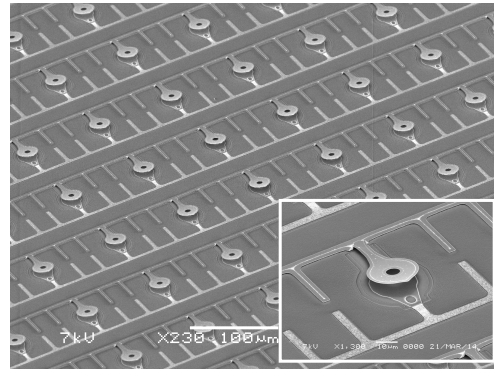


図5 MEMS-SRRのSEM画像

このデバイスを時間領域THz分光器に掛けて透過特性を測定した結果を図6に示す。同図には、電磁界解析シミュレータHFSSで予想した特性(破線)を併せて表示している。MEMS-SRRへの電圧印加ON/OFFによって、バンドストップ共振が低周波数、高周波数間でスイッチしている様子が確認できた。

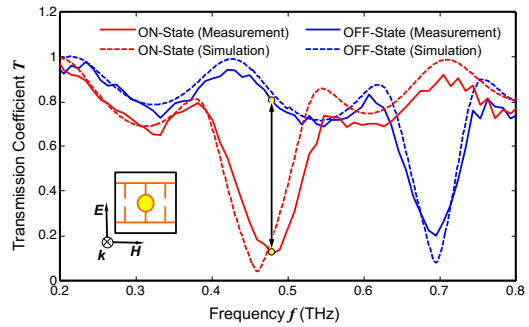


図6 標準MEMS-SRRの可変バンドストップ特性

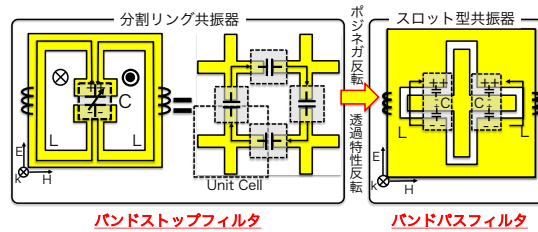


図7 MEMS-SRRの双対変換

以上の結果は、THz光スペクトルのうち、MEMS-SRRの共振に一致した波長の光を遮断し、その他のほとんどの波長は透過するバンドストップフィルタとして機能していることを示している。これに対して、本研究の可変THz空間フィルタを構築するには、では任意の波長帯のTHz光のみを透過するバンドパスフィルタをMEMS素子として実現するのが望ましい。そこで本研究では図7に示す考え方でMEMS-SRRの金属パターンの白黒を反転させ、電磁界的には双対の特性をもつバンドパスフィルタを設計する手

法を考案した。

双対変換により得られたTHzバンドストップフィルタの構造を図8に示す。全体としてはクロススロット構造と呼ばれる電磁界共振回路の体裁を取っており、中央部分のクロス縦線が隣のユニットセルと接続されて、MEMS静電駆動用の共通GNDとして機能する。また、周囲からクロス部分に向かって複数のカンチレバー状の静電駆動機構が伸びており、この部分は印加電圧によってデジタル制御可能な静電容量として使用できる。

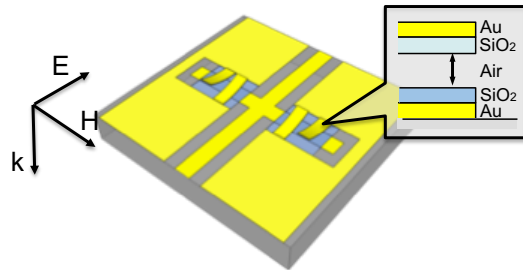


図8 MEMS可変クロススロット構造

図9に本研究で製作したMEMS可変クロススロット構造のSEM写真を示す。クロススロットの左右にあるカンチレバー群は、それぞれ右、左でグループ化されており、カンチレバーの静電駆動状態によって(UP, UP)、(UP, DOWN)、(DOWN, UP)、(DOWN, DOWN)の四状態を取り得ることから、4本のバンドパス周波数間で状態を遷移可能である。

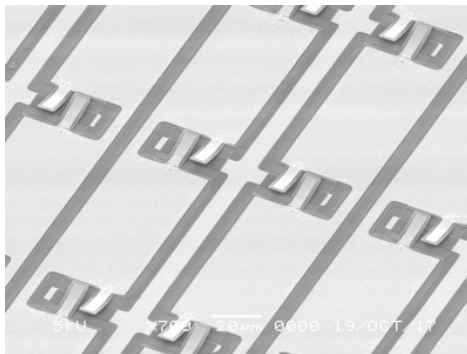


図9 MEMS可変クロススロット構造のSEM写真

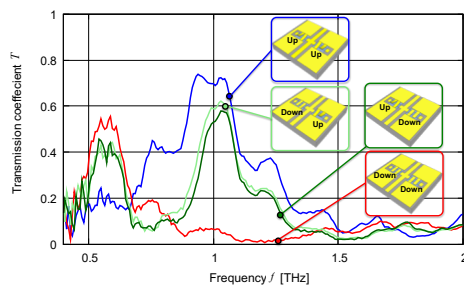


図10 MEMS可変クロススロットのバンドパス特性

ただし、実際には左右片方を駆動した(DOWN, UP)状態と(UP, DOWN)状態の特性は図10のTHz透過特性計測結果に示すようにほぼ等しい。これは、左右のカンチレバー形状をほぼ等しく設計したことによる。両者を大きく違えた四状態バンドパス構成も理論上可能である。

以上これを要するに、本研究ではMEMS静電駆動機構を用いてTHz光に対する可変バンドパス特性を有する独自のクロススロット形状の透過型フィルタを考案し、電磁界解析によってその可変特性を解析するとともに、実際に金属/絶縁体薄膜の表面マイクロマシニング技術を用いてデバイスを試作し、その光学特性が解析予想通りに機能することをTHz光学測定によって検証したものであり、将来のTHz光用デジタル可変光学素子の基礎を確立した研究である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1. Zhengli Han, Kenta Kohno, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi, "Terahertz Devices with Reconfigurable Metamaterial by Surface MEMS Technique," IEEJ Trans. SM, vol. 136, no. 11, 2015, pp. 450-453. (<https://doi.org/10.1541/ieejsmas.135.450>)
2. Zhengli Han, Kenta Kohno, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi, "Tunable Terahertz Filter and Modulator Based on Electrostatic MEMS Reconfigurable SRR Array," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE), vol. 21, no. 4, 2015, pp. 1-9 (DOI 10.1109/JSTQE.2014.2378591)

[学会発表] (計10件)

1. 市川和秀、韓正利、高橋巧也、年吉洋、「MEMS可変メタマテリアルを用いたテラヘルツ・バンドパスフィルタ」電気学会第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2017年10月31日～11月2日、広島国際会議場。
2. Zhengli Han and Hiroshi Toshiyoshi, "Structure Reconfigurable Metamaterial Plate with MEMS Technique for THz Wave Beam Shaping," in Proc. 11th International Congress on Engineered Material Platforms for Novel Wave Phenomena (Metamaterials 2017), Aug. 28th - Sept. 2nd, 2017, Marseille, France.
3. Kazuhide Ichikawa, Zhengli Han, and Hiroshi Toshiyoshi, "Tunable Terahertz

- Bandpass Filter using MEMS Reconfigurable Metamaterial,” in Proc. IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN2017), Aug. 13-17, 2017, Santa Fe, New Mexico, USA.
4. Kazuhide Ichikawa, Zhengli Han, and Hiroshi Toshiyoshi, “MEMS Metamaterial Tunable Filters for THz Optics,” in Proc. 2017 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2017), July 3-5, 2017, Hotel Hyundai, Gyeongju, Korea.
  5. Zhengli Han and Hiroshi Toshiyoshi, “MEMS Reconfigurable Metamaterials for a Switchable THz Band Pass Filter,” in Proc. 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP8), May 22-26, 2017, Taipei, Taiwan.
  6. Zhengli Han, Takuya Takahashi, and Hiroshi Toshiyoshi, “A MEMS Metamaterial for Dynamic Terahertz Wave Switching,” in Proc. 16th Int. Conf. on Nanotechnology (IEEE NANO 2016), Aug. 22-25, 2016, Sendai, Japan.
  7. Zhengli Han, Takuya Takahashi, and Hiroshi Toshiyoshi, “A THz Dynamic Switch with MEMS Metamaterial Method,” 第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日～22日、東京工業大学・大岡山キャンパス、20a-S423-9.
  8. Zhengli Han and Hiroshi Toshiyoshi, “Coupling Mechanism Analysis for MEMS Reconfigurable Metamaterial Device,” IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2016), July 31 - August 4, 2016, Singapore.
  9. Zhengli Han, Kenta Kohno, Kazuhiko Hirakawa, Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, “A Switchable THz Band Pass Filter with MEMS Reconfigurable Metamaterials”、電気学会第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2015年10月28日～30日、朱鷺メッセ（新潟コンベンションセンター）.
  10. 韓 正利、河野健太、平川一彦、藤田博之、年吉 洋、「MEMSスプリットリング共振子アレイを用いたテラヘルツ光可変フレネルレンズ」電気学会E部門総合研究会、2015年7月2日、九州大学医学部百年講堂.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

年吉 洋 (TOSHIYOSHI, Hiroshi)  
国立大学法人東京大学・先端科学技術研究センター・教授  
研究者番号：50282603

### (2) 研究協力者

韓 正利 (HAN, Zhengli)  
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・基礎科学特別研究員  
研究者番号：20752702