## MEMS 可変共振子アレイによるテラヘルツ光スキャナ

	2031008			
研究代表者	東京大学 先端科学技術研究センター	教授	年 吉	洋

A Terahertz Scanner based on MEMS Tunable Resonator Array

[研究の目的]

非破壊検査の新たな手法として、テラヘルツ 光を用いた検査機器の開発が進められている。 ただし、テラヘルツ光のポテンシャルは単に金 属異物の検出にはとどまらない。この波長帯で 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。従来の研究では テラヘルツ光の光源と検出器に開発の重点が置 かれてきたが、本研究は小型・高機能なテラへ ルツ光学系の実現を目指して、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による可変 透過光フィルタの設計、製作、評価を実施する。

## [研究の内容,成果]

自然界の誘電体はテラヘルツ光(0.1 THz~ 10 THz)に対して透明なものが多く、薄いレ ンズを作るための屈折率材料として有効に機能 するものが少ない。このため、従来のテラヘル ツ光学系は図1に示すような反射光学系として 構築されることが多かった。これをコンパクト な光学系に変換するため、本研究ではパターン 可変型のフレネルレンズのような透過光学系を、 MEMS 技術を用いて構築する。また、そのた めの基本デバイスとして、図2に示すような Split Ring Resonator (SRR)型の共振子アレイ を用いる。 この共振子では微小な金属環の一部に切れ込 みが入っており,金属配線部分のインダクタ成 分Lと切れ込み部分の容量成分CによってLC



図1 テラヘルツ光学系の概念図



共振子を構成し,透過しようとする電磁波を反 射して遮断することが知られている。

本研究では図3に示すように、SRRのC成 分を MEMS 静電アクチュエータによって ON/OFF 制御して、透過スペクトルを可変に する手法を考案した。本研究で取り扱う MEMS-SRR は, 厚さ 300 µm 程度の石英基板 上に金属薄膜(金、クロム)によって四角形状 の SRR 構造を形成し、中央のスプリット部分 の上にブリッジ状の可動電極を配置することで 容量を可変にしたものである。電磁界解析ソフ ト HFSS を用いた解析により, 一辺 100 μm の SRR 構造の共振周波数は数百 GHz の範囲に設 計可能であることが分かった。なお、本研究で は通常のフォトリソグラフィを使用して金属パ ターンを形成することから、線幅6µm、最小 ギャップ8µm を設計寸法として SRR を構成 した。また、可変ピクセル型のテラヘルツ光 フィルタを構成する基本構造として.5×5個 の MEMS-SRR をアレイ状に配置した構造を



図3 MEMS型SRR構造

テラヘルツ光用の1画素として使用することを 検討した。

電磁界解析によって SRR 内部の1次モード の表面電流分布を計算した結果を図4に示す。 これにより, SRR 中央の容量Cを境界にして, 左右対称の電流分布が形成されていることが分 かる。また, SRR 上部の左右にある金属パ ターンには電流が流れておらず,この部分はテ ラヘルツ共振に寄与していない。このことから, SRR のパターンを一列に横に接続しても共振 状態は劣化せず,むしろ,MEMS構造を静電 駆動するための電気配線として利用可能である ことが分かった。そこで本研究では,SRR の パターンを下部電極として,図5に示すような MEMS 可変静電容量の一斉駆動方式を考案し た。

以上のようなアレイ型の SRR 構造を想定し て周期境界条件を課して電磁界解析を行った結 果,図6に示すようなテラヘルツ光の透過スペ クトルの変化が得られた。解析では MEMS 可 変容量の効果を組み込むために、モデル中の上 下電極間の絶縁層(シリコン酸化膜)の厚みを 数段階に分けて計算している。この結果、



図4 SRR 内部の共振時の電流分布





— 66 —

MEMS 電極の沈み込み量の増大にともなって 絶縁層が薄くなり,静電容量が増大することか ら,テラヘルツ光の共振周波数が低周波数側に シフトする様子が確認できた。なお,透過率に 見られる緩やかなうねりは,使用した基板内で のテラヘルツ光の干渉に起因する透過率の変化 である。

金属系材料を用いた表面マイクロマシニング によって MEMS 型 SRR を製作する手法を図7 に示す。まず、パイレックス基板上に SRR の 下部電極を Cr/Au/Cr のスパッタ積層膜で形 成した後に、全体をシリコン酸化膜で被覆する。





図7 MEMS-SRR 製作方法

次に, 犠牲層となるフォトレジストを形成して, MEMS 可変容量の上部電極となるシリコン酸 化膜/Cr/Auを積層し, フォトリソグラフィで パタニングする。最後に, 酸素アッシングに よってフォトレジストを除去することで, 可動 構造体をリリースする。

この方式で製作した MEMS 型 SRR 構造を 図 8 に示す。ここでは 40 mm 角の石英基板上 に 8 種類の SRR パターンを集積している。ア レイサイズ 6 mm 角内に,約 3600 個の SRR を 配置した。なお、測定に用いたテラヘルツ光の ビーム幅は約 5 mm である。

図 9 に MEMS-SRR の静電駆動特性を示す。 典型的な例では,直流電圧 10V によって静電 プルイン動作が確認され,ギャップの初期値 3 μm に等しい上下動が観察された。また, MEMS-SRR の機械的な共振周波数は 10 kHz から 50 kHz の間で設計可能である。

製作した MEMS-SRR を静電駆動しながら テラヘルツ光の透過率を測定した結果を図 10 に示す。当初予想通り, MEMS-SRR の ON 動 作によって容量が増大し, 共振周波数が 690



図8 MEMS-SRR の製作結果



図9 MEMS-SRRの静電駆動特性



図 10 MEMS-SRR のテラヘルツ透過特性

GHz から 450 GHz 付近に低下している様子が 確認できた。

## [今後の研究の方向, 課題]

本研究により MEMS-SRR の静電駆動に よってテラヘルツ光の制御が可能であることが 明らかになった。今後は MEMS-SRR アレイ を大規模化して,グレーティングや,図11に 示すようなフレネル・ゾーンプレートのパター ンを可変にする実験を実施する。また本研究の 成果に基づき,将来的には食品工場の品質検査 や残留農薬検出,医薬品の純度測定や投薬効果 の定量的評価などへの幅広い応用先への展開を 目指す。

## [成果の発表]

- 韓 正利,河野健太, Tapio Makela, Tomi Haatainen, 平川一彦,藤田博之,年吉洋:「静電駆動型 Split-Ring 共振子アレイの THz フィルタ応用」第 30 回 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポ ジウム,2013年11月5日~7日,仙台国際セン ター,7PM1-B-2.
- (2) Zhengli Han, Kenta Kohno, Tomi Haatainen, Tapio Makela, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi: "ELECTROSTATIC MEMS TUNABLE SPLIT-RING RESONATORS FOR THZ FILTER APPLICATIONS," in Proc. IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2013), Kanazawa, Japan, Aug. 18-22, 2013, pp. 165-166.
- (3) Zhengli Han, Kenta Kohno, Tapio Makela, Tomi Haatainen, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi: "A Tunable THz Filter based on Electrostatic MEMS Split Ring Resonator Array," in Proc. 7th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies (APCOT 2014), June 29–July 2, 2014, EXCO, Daegu, Korea.
- (4) 韓 正利,河野健太, Makela Tapio, Haatainen Tomi, 平川一彦,藤田博之,年吉洋:「静電駆動カンチレ バーによる MEMS スプリットリング共振子アレイ のテラヘルツ可変フィルタ応用」,平成 26 年度電気 学会 E 部門総合研究会,2014 年 5 月 27 日~28 日, 東京大学生産技術研究所



図 11 MEMS-SRR による可変レンズ解析