

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17452

研究課題名（和文）MEMSを用いた可変メタマテリアルによるTHzビームステアリング素子

研究課題名（英文）A THz beam steering device using tunable MEMS metamaterials

研究代表者

磯崎 瑛宏（Isozaki, Akihiro）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：10732555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、可変マイクロ構造を用いてテラヘルツ光をアクティブに操作する光学素子を新規開発することを目的として行った。これまでの研究の多くが、可変マイクロ構造の光学的応答を調べることに終始していたことに対して、本研究では、実用化へ向けて大面積化の課題抽出やシンプルな駆動方法の基礎検討を進めたことが主な成果である。具体的には、大面積化に向けてマイクロ構造の支持構造を入れたときの悪影響に関して実験・シミュレーションの両面から丁寧に解析を行った。また、シンプルな駆動方法として、音響波による駆動を試みて、実現可能であることを示す結果を得た。

研究成果の概要（英文）：I aimed this project at developing novel optical devices with tunable microstructures to perform active manipulation of terahertz light. Researchers in this field are interested in the optical function of their tunable microstructures. On the other hand, in this project, I researched not only the function of the microstructures but also the way to achieve large-sized devices and simple actuation methods for practical devices. Specifically, for large-sized devices, I investigated optical responses of support frames of the microstructures using both experimental methods and simulation methods. Moreover, as a simple actuation method, I proposed an acoustic actuation method, which is a unique method, and achieved feasible data for practical usage.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS メタマテリアル テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波の検出および発生は 1990 年ごろに初めて実現され、現在ではタンパク質の高次構造やがん細胞の活動状況など、可視光や赤外光では得られない情報を取得できる重要な周波数帯として着目されていた。さらにテラヘルツ分光分析を研究室単位で行えるようになってきた。一方で、テラヘルツ帯の光学素子の開発は遅れていた。特に、テラヘルツ波は多くの物質に透明であるため、ビームステアリング素子をはじめとする動的な高機能光学素子は実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、テラヘルツ光学系の光学素子として機能するような小型メタマテリアルの実現へ向けて、要素技術を向上させることを目的としている。特に、可変構造を用いて、アクティブに光学特性を制御できる素子の開発に向けて、現実的な問題点の洗い出しと、その解決方法を見出す。

3. 研究の方法

テラヘルツメタマテリアルは、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて作製する。具体的には、メタマテリアルの光学的機能を発揮する微細金属構造部分と、その金属構造を支えてかつ駆動する微細な可変機械構造を集積する。このとき、素子全体の大きさは 1 インチ角のチップに収まる程度し、小型メタマテリアルとして実現する。一方で、メタマテリアルとしては大面積の受光面 (1 cm 角程度) を確保することを目標とする。構造の設計は有限要素法に基づくシミュレーションを用いて行う。また、試作したデバイスのテラヘルツ応答を計測し、設計との差異がある場合には、その原因を実験とシ

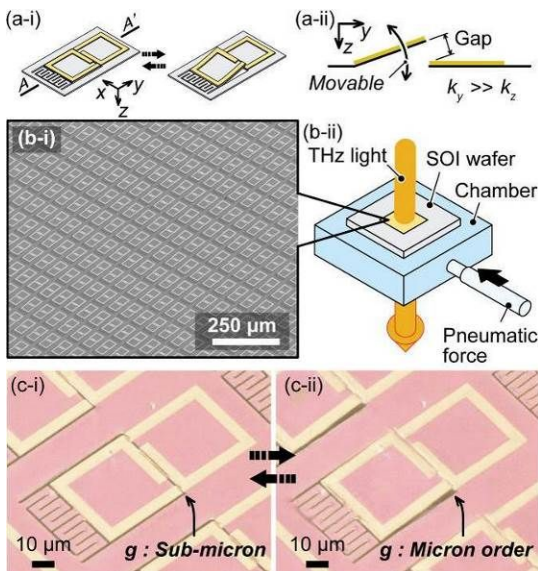


図 1 試作したメタマテリアル

ミュレーションの両面から検討する。

4. 研究成果

本研究では、大きく分けて 3 つの成果を得た。すなわち、(1) メタマテリアルの詳細な理解 (雑誌論文、学会発表)、(2) メタマテリアル作製上の制約と物理現象の理解 (雑誌論文)、(3) 新規駆動原理の提案と実証実験結果 (学会発表) である。

(1) メタマテリアルの詳細な理解

図 1 に示すような MEMS メタマテリアルを試作し、テラヘルツ応答を調べるとともに、このデバイスの性能をシミュレーションを用いて詳細に調べた。本試作デバイスの特徴は入射波長と比較してわずか 1000 分の 1 以下の大きさの構造をアクティブに制御することにある。このとき、電磁波とその構造の相互作用は、波長オーダーの構造との相互作用と比べて複雑なものとなる。シミュレーションにより光学応答を調べることにより、試作デバイスが、この微小な構造付近に生じる電場増強を上手く利用できていることが明らかになった。さらに、上記のシミュレーションを実施する過程で新たな知見が生まれた。具体的には、次のようなものである。ここで試作したデバイスは、光学応答する構造として厚さ 100 nm 程度の金の配線構造を用いている。ただし、マイクロマシンの製作プロセスの制約上、この金配線は厚さ 300 nm のシリコン基板上にパターニングしている。このとき、テラヘルツから見てシリコンは透明であり、かつ、300 nm はテラヘルツの波長のわずか 1000 分の 1 に当たるので、ほぼ影響がないと考えていた。しかしながら、金構造のみでシミュレーションした結果と実験結果では 10% 程度応答波長が異なっていた。さらに詳細に調べると、金構造とシリコン構造が近接場効果により強く応答しているこ

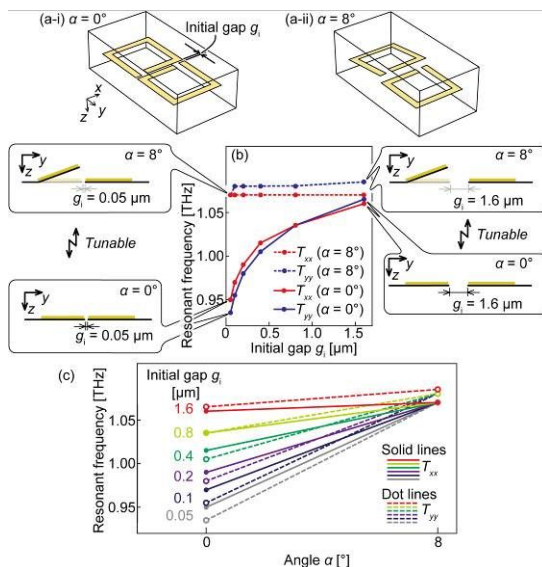


図 2 微細構造のテラヘルツ応答解析結果

とを示唆する結果を得た。これは MEMS を用いたアクティブメタ材料を作製する上で広く使える知見であると期待している。

また、微細金属構造のギャップを小さくすることのメリットを明確にすることを目的としてシミュレーションを行った。図 2 にシミュレーション結果を示す。このことにより、初期ギャップを小さく設計することにより、わずかな機械的変形でも大きくテラヘルツ光学応答を変化させることができることが明確になった。一般に MEMS 構造の駆動幅を大きくするのは難しいので、ここで得られた知見は MEMS メタ材料設計において非常に重要であると考えられる。本成果は、学術論文誌の形でまとめ、Optics Express に掲載された(雑誌論文)。

(2) メタ材料作製上の制約と物理現象の詳細な理解

試作したメタ材料をテラヘルツ光学素子として用いるためには、デバイスの大面積化が必要になる。それに伴い出てくる課題に関する定量評価を実験・シミュレーションの両面から行った。上記で提案・試作してきたデバイスの特徴は 300 nm の非常に薄い

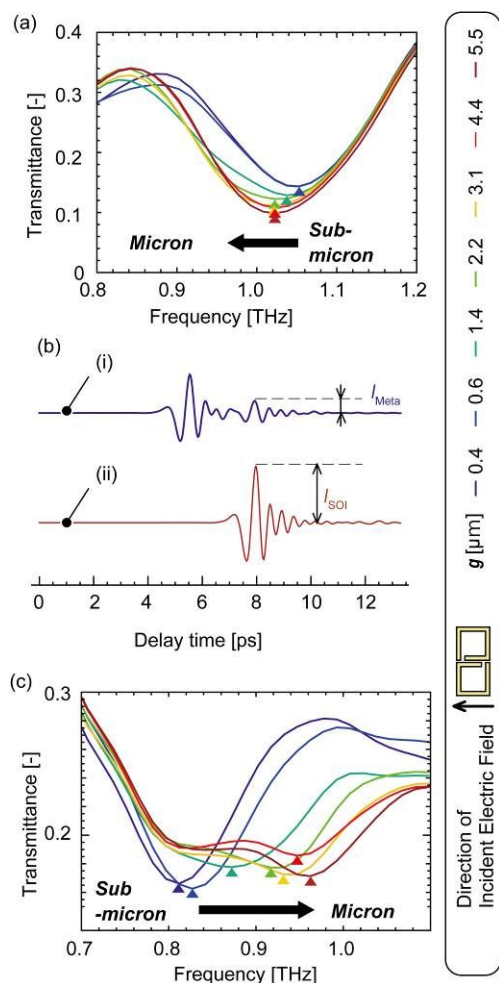


図 3 デバイスのテラヘルツ応答と大面積化における課題特定

シリコン膜の上に可変メタ材料構造が多数配置されていることにある。デバイスの基礎検討に置いては、ごくわずかな領域のメタ材料が機能すればよかったので、例えば 3 mm 角のデバイスを作製し、検討することができた。しかしながら、本研究課題の目的である、テラヘルツ光学系の素子の一部として用いることを考えると、デバイスの大面積化は必須の課題となる。そこで、微小シリコンフレームを 3 mm ごとに配置して、メタ材料を作製することにより、デバイスの大面積化を試みて、そのデバイスの機能を定量的に評価した。試作したメタ材料素子を用いて、テラヘルツ光の透過特性を評価すると、基礎検討時の動作とは明らかに異なる応答を示した(図 3(a))。ここで、この違いの原因を明らかにするため、透過テラヘルツ光の性質を、時間領域で丁寧に観察した(図 3(b))。そのことにより透過光にわずかな揺らぎがあることを発見し、その起源がフレームの影響であることが示唆された。実際に、時間領域の波形から数値的にフレーム構造の影響を取り除くことにより、素子単体で検討した通りの周波数応答を再現できることが確認できた(図 3(c))。

デバイスの大面積化のために使用可能な知見として確立するために、この現象をシミュレーションにより詳細に調べた。その結果、微小シリコンフレームが導波路のように働いていることを示唆する結果を得た。さらなる検討のため、導波路モードを解析的に計算

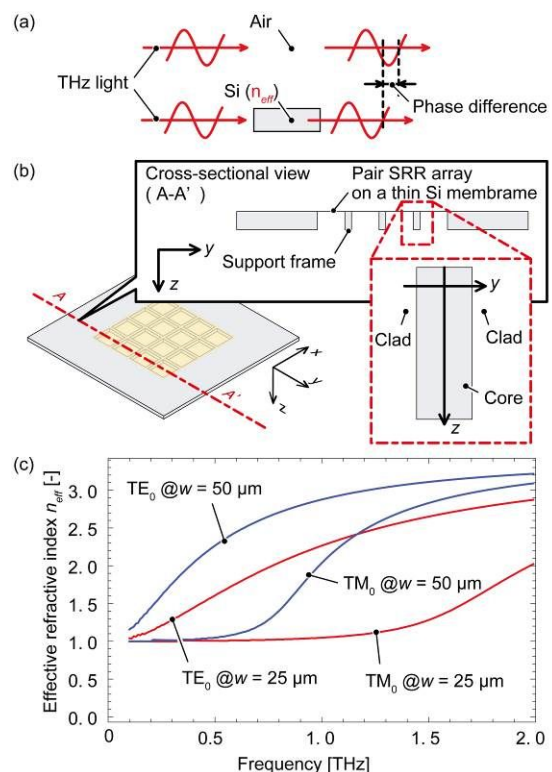


図 4 フレームのテラヘルツ応答と導波路モデルによる解析結果

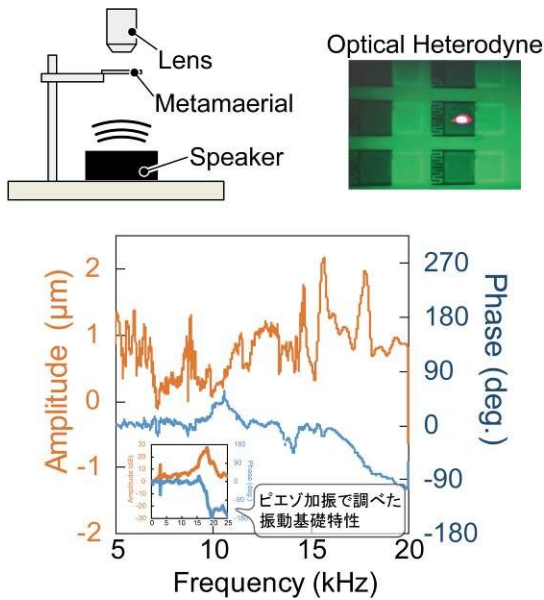


図5 超音波によるメタマテリアルの駆動

してみると、実験結果およびシミュレーション結果とぴったり一致した(図4)。このことにより、デバイスの大面積化における知見を得ることができた。これらの検討は、新規デバイス開発に比べて非常に地味なものであったが、重要な知見であると高く評価され、電気学会論文誌に採択(雑誌論文)された。

(3) 新規駆動原理の提案と実証実験結果

ここまで試作・解析を行い、大面積のテラヘルツ光学素子として使用するためのMEMSメタマテリアル実現へ向けた知見を構築してきた。テラヘルツ光学素子として使えるようにするためには、さらに駆動方法を新規に提案する必要がある。すなわち、本課題の申請時は、デバイスは空気圧駆動方法による機械的な変形を用いて光学応答をアクティブに制御していた。空気圧駆動方法は、従来広く用いられてきた静電駆動方法と比較して大きな力を印加できるという特徴を有する。しかしながら一方で、空気圧印加に用いるシステムは非常に大きくなってしまふ。さらに空気圧チャンバを要するため、テラヘルツ波の透過率が低下するし、チャンバに用いる窓材による多重反射により透過したテラヘルツ波が乱れてしまう。これらは、本研究課題の目的である「小型化」と「ビームステアリング」の実現へ向けて本質的な課題である。そこで、新たな駆動方法として、音響波を用いた駆動方法を検討した。試作したメタマテリアル構造を用いて構造の特性を計測すると、20 kHz付近に共振点を持つことが確認できた。そのうえで、図5に示すように、音響波を試作デバイスに印加して構造の変位量および位相を計測した。その結果、共振点付近で2 μm程度の変位を得ることに

成功した。以上のように、試作デバイスの新たな駆動方法を提案し、小型ビームステアリング素子の実現に適用可能であることを示した。この結果はメタマテリアルの新規な駆動方法として高く評価され、第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウムにてポスター賞を受賞した(学会発表)。

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)

磯崎 瑛宏, 菅 哲朗, 高橋 英俊, 松本 潔, 下山 勲, “薄膜メタマテリアル実現に向けたフレーム構造のTHz 応答解析,” 電気学会論文誌 E, (査読あり、採択済み、2018年7月掲載予定)

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*, Optical Society of America, Vol. 23, Issue 20, pp. 26243-26251, 2015. (DOI: 10.1364/OE.23.026243) (査読あり)

〔学会発表〕(計 2 件)

磯崎 瑛宏, “薄膜基板上のテラヘルツMEMSメタマテリアル”, COMSOL CONFERENCE 2017 Tokyo, 秋葉原, 日本, December 8, 2017. (**優秀ポスター発表者賞**)

磯崎 瑛宏, 菅 哲朗, 高橋 英俊, 松本 潔, 下山 勲, “自立構造型メタマテリアル”, 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, 広島, 日本, October, 31- November 2, 2017. (**優秀ポスター賞**) (査読あり)

〔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

<https://sites.google.com/site/akihiroisozaki/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

磯崎 瑛宏 (ISOZAKI, Akihiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号: 10732555