

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13648

研究課題名（和文）量子干渉型メタマテリアルの構造変形を伝達関数としたナノ空間局在フォトンモード制御

研究課題名（英文）Control of nano-spatial localized photon modes with transfer function of structural deformation of quantum interference metamaterial

研究代表者

金森 義明 (Yoshiaki, Kanamori)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10333858

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：エアギャップの微小変位に対して光学応答を示す可動メタマテリアルを製作し、計算結果と同様の光学変化の実証に成功した。機械的に変形するメタマテリアルの構造変形を伝達関数とした物理量トランスデューサを構築し、光学式フォースセンサとして可動メタマテリアルのデバイスを製作し、その特性を評価した。伝達関数の設計を行う観点からデバイスを設計し、その光学応答特性を理論と実験の両面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

可動光メタマテリアルを用いた新原理の物理量トランスデューサとして、新たな超高感度センサや超小型光処理デバイスを創出する挑戦的な研究であり、ナノテクノロジー、計測工学、光情報処理の分野に新たな知見を得るのみならず、安心安全で豊かな社会を構築するセンサ・光情報処理の基盤となる革新的技術となる。

研究成果の概要（英文）：We fabricated movable metamaterials that exhibited optical response to minute displacements of air gaps. We successfully demonstrated their optical changes similar to the calculated results. A physical quantity transducer whose transfer function was the structural deformation of a mechanically deformed metamaterial was constructed. Then, movable metamaterial devices as optical force sensors were fabricated and evaluated its characteristics. We could design the device from the viewpoint of designing the transfer function, and find out its optical response characteristics from both theory and experiment.

研究分野：ナノ光学、微細加工学

キーワード：メタマテリアル マイクロ・ナノデバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

MEMS による可動メタ材料の報告例は、光領域では 3 件のみであり、放射損失が少なく実用性の高い量子干渉効果に基づくメタ材料を動的に制御した例は報告例が無い。更に、入力（外力の物理量）と出力（局在フォトンモード）の物理量トランスデューサという観点で伝達関数（機械構造変形）をシステム設計する概念は皆無であり、伝達関数としての機械構造設計指針および製作技術の確立は、超高感度計測や超小型光処理技術への応用展開と直結する。

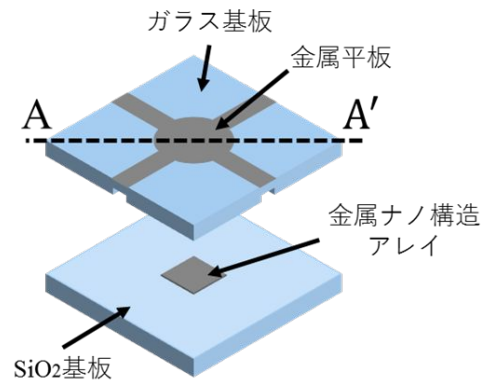
2. 研究の目的

機械可動部を持つメタ材料を用いて外力によりメタ材料の局在フォトンモードを動的制御するシステムを実現し、伝達関数としての機械構造設計指針および製作技術を確立し、物理量トランスデューサとしての応答特性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究で提案するエアギャップ構造をもつ Metal/Insulator/Metal (MIM)メタ材料センサの概略図を図 1 に示す。金属ナノ構造アレイを製作した基板と金属平板を製作した 2 つの基板を向かい合わせて配置する。金属ナノ構造アレイ基板側から白色光を入射して反射光を測定する。金属ナノ構造アレイ側の基板は光が透過するため、反射率や屈折率などの物性値が明瞭な透明基板として SiO₂ 基板を、金属平板側の基板は光が透過せず、光学特性に影響が無いため、安価なガラス基板を採用した。ガラス基板にはエアギャップのための円板状の溝があり、溝の表面上に金属平板が成膜されている。

提案する MIM センサの動作原理の概略図を図 2 に示す。金属ナノ構造アレイ側から白色光を垂直入射し、反射スペクトルを測定する。金属平板は光が透過しないよう十分な厚みがあるため高い反射率を示すが、MIM メタ材料が入射光と共振する波長で、反射率に大きなディップが生じる。金属平板側から荷重がかかることで金属平板がたわみ、エアギャップが変化する。それに応じて MIM メタ材料の共振波長も変化する。誘電体層の厚みと共振波長は一対一の関係があるため、共振波長を読み取ることでエアギャップの厚み、そして荷重の値を測定できる。



・断面図 (A - A')

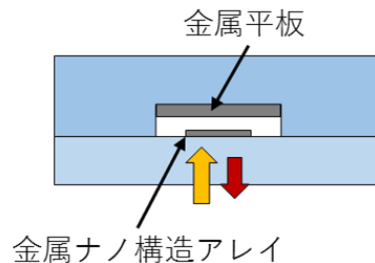


図 1 提案するエアギャップ構造をもつ MIM メタ材料の概略図

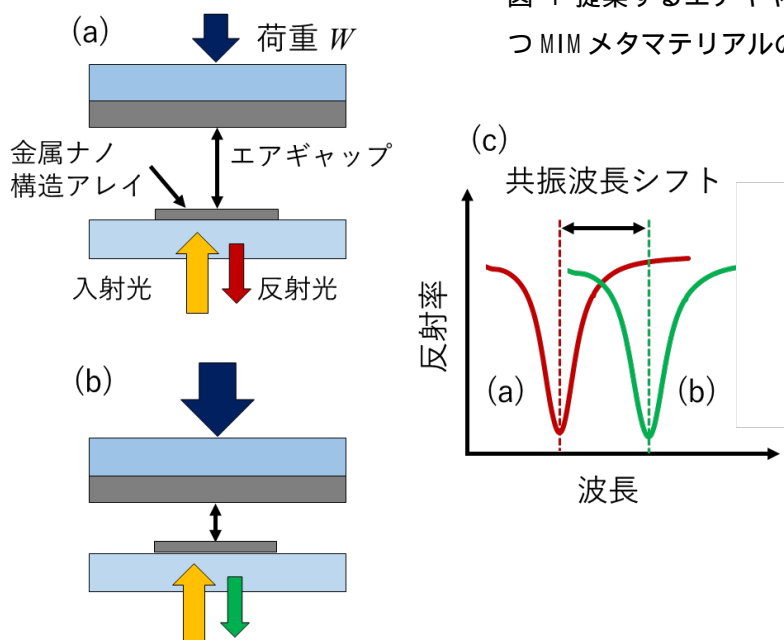


図 2 提案する MIM メタ材料センサの動作原理の概略図

(a) 荷重が小さいときの断面図。(b) 荷重が大きいときの断面図。(c) エアギャップによる共振波長の変化

4. 研究成果

(1) デバイスの光学設計

Rigorous Copled-Wave Analysis (RCWA) 法を用いてナノドット構造型の MIM メタマテリアルの光学設計を行った。誘電体を空気にしても MIM メタマテリアル特有の光学特性が生じることを示した。次に、共振波長のエアギャップ依存性はエアギャップの値によって変化するが、エアギャップに対する共振波長のシフト量はエアギャップが 40 nm 以下の狭い領域で常にファブリ・ペロー干渉型よりも大きな値になり、光学式フォースセンサへの応用の可能性を示した。

(2) デバイスの製作

図 3 に、光学設計に基づき製作したナノ構造アレイの外観写真を示す。リフトオフプロセスで Al / SiO₂ ナノ構造アレイを十分な精度で製作することに成功した。基板の中央付近にナノ構造アレイによる構造色が確認でき、一様な発色をしていることからナノ構造アレイが所定の領域に均一に形成できていることが分かる。ナノ構造アレイ基板と金属薄膜が形成された基板を紫外線硬化樹脂で接合させることでデバイスを完成させた。

金属ナノ構造アレイ

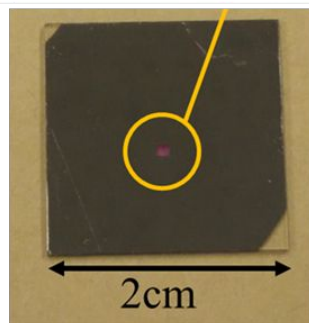


図 3 製作したナノ構造アレイ基板の外観写真

(3) 光学測定

図 4 にエアギャップ構造をもつ MIM メタマテリアルの測定方法の概略図を示す。ナノ構造アレイ側から白色光を入射し、倒立顕微鏡と分光器を用いて反射スペクトルを測定する。Z 軸オートステージで Al 平板側の基板を押し付け、エアギャップを制御する。Z 軸オートステージでかけている荷重はフォースゲージを用いてリアルタイムで測定を行なう。

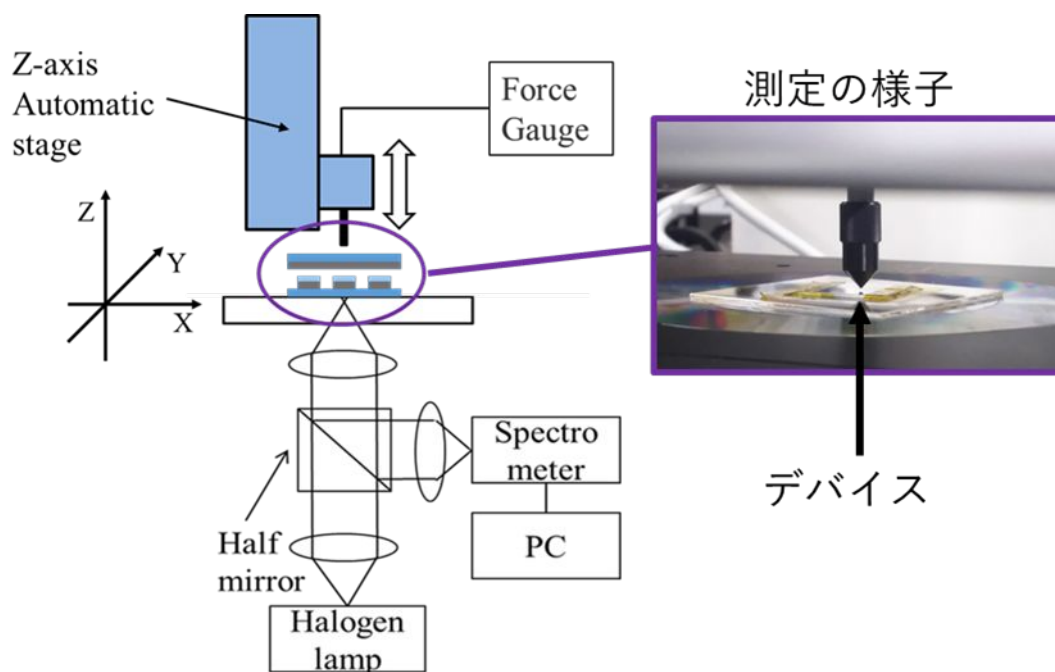


図 4 測定方法の概略図

Al 薄膜を成膜したダイアフラム構造に荷重をかけ、Al 薄膜を Al / SiO₂ ナノ構造アレイに近づけることでエアギャップを制御し、MIM メタマテリアルの反射スペクトルの測定を行った。製作した MIM メタマテリアルに荷重をかけると MIM メタマテリアル特有の反射スペクトルのディップが生じた。所定の荷重範囲で共振波長が 1430 ~ 1631 nm と変化し、光学特性変化の傾向は計算結果と一致した。以上のことから、荷重によって光学特性が変化することを確認し、微小変位に応答する可動 MIM メタマテリアルの製作に成功した。

(4) まとめ

エアギャップの微小変位に対して光学応答を示す可動 MIM メタマテリアルを製作し、計算結果と同様な光学特性変化の実証に成功した。機械的に構造変形するメタマテリアルの構造変形を伝達関数とし、入力を外力、出力を局在光子モードとする物理量トランスデューサを構築

し、光学式フォースセンサとしてその特性を評価した。各物理量に適した伝達関数の設計を行う観点からデバイスを設計することができ、その光学応答特性を理論と実験の両面から明らかにした。可変光フィルタとしてセンサやディスプレイ、光通信分野などへ応用が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

Yoshiaki Kanamori、Daisuke Ema、Kazuhiro Hane、Miniature Spectroscopes with Two-Dimensional Guided-Mode Resonant Metal Grating Filters Integrated on a Photodiode Array、Materials、査読有、11巻、2018、1924(11pp)

DOI:10.3390/ma11101924

Yuto Moritake、Yoshiaki Kanamori、Kazuhiro Hane、Dynamic Spectral Control of Fano Resonance by MEMS Actuated Optical Metamaterials、電気学会論文誌 E、査読有、137巻、2017、357-362

DOI: 10.1541/ieejsmas.137.357

大久保藍、金森義明、羽根一博、面外配置された非対称型ダブルバーメタマテリアルの製作と光学応答、電気学会論文誌 E、査読有、137巻、2017、363-370

DOI: 10.1541/ieejsmas.137.363

〔学会発表〕(計20件)

金森義明、ナノフォトニック構造のMEMS制御、平成29年電気学会全国大会、2017

Ai Ookubo、Yoshiaki Kanamori、Kazuhiro Hane、Movable transparent membranes designed for tunable metamaterials in the optical region、The 1st A3 Metamaterials Forum、2016

森竹勇斗、金森義明、羽根一博、MEMS駆動光メタマテリアルによるファノ共鳴スペクトル制御、電気学会フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム合同研究会、2016

大久保藍、金森義明、羽根一博、金属・誘電体・金属構造の非対称型ダブルバーメタマテリアルの製作と光学特性、電気学会フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム合同研究会 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hane.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者

無し

(2)研究協力者

研究協力者氏名：羽根 一博

ローマ字氏名：(HANE, kazuhiro)

研究協力者氏名：佐々木 敬

ローマ字氏名：(SASAKI, takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。