

令和元年6月3日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14128

研究課題名(和文) 簡便かつ低コストな高性能ファノ共鳴光メタマテリアルの開発

研究課題名(英文) High Quality Optical Fano Metamaterials by Simple and Low Cost Fabrication Method

研究代表者

森竹 勇斗 (Moritake, Yuto)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：50783049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ADB構造における遠方場によるファノ共鳴を用いることで、ナノ構造の精密な位置制御を必要としない高性能なファノ共鳴光メタマテリアルの検討・開発を行った。円形構造からなるADBメタマテリアルでは高性能なファノ共鳴が得られず、ロッド状の構造を用いる必要があることがわかった。また、ADB構造に基板エッチング技術を導入することによって、ファノ共鳴によるセンシング感度を向上できることを確かめた。さらに、3次元メタマテリアル構造におけるファノ共鳴の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高性能なファノ共鳴光メタマテリアルを得るための形状に関する知見が得られた。また、基板エッチングによるセンシング性能の向上は、幅広い金属ナノ構造に適用可能である。以上から、プラズモニック構造を用いたセンシング技術の重要な要素技術を得ることができた。3次元構造におけるファノ共鳴の観測では、複雑な共鳴応答が3次元構造で制御可能であることを実験的に示すことができた。これは、光メタマテリアル研究における複雑な電磁応答とその制御性の理解を進めたという点で学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：I investigated optical Fano metamaterials with high Q-factors based on far field interference in ADB metamaterials. It was revealed that gold nano-rods are suitable to realize high Q Fano resonance. By applying substrate etching technique, refractive index sensitivity of optical Fano metamaterials can be improved. Moreover, b-anisotropic Fano resonance was demonstrated using 3D split ring structures.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：メタマテリアル プラズモニクス ファノ共鳴 微細加工技術

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

### 1. 研究開始当初の背景

生化学物質のセンシングは、学術研究・産業研究の効率化だけでなく、医療やセキュリティ分野においても重要な技術であり、活発に研究が行われている。特に、センシングの高感度化は、微量な試料・物質の検出において重要であり、より簡便かつ低コストな手法の開発に多くの努力が払われてきた。センシングの感度を向上させる手法として、金属微細構造におけるプラズモン共鳴を利用する方法がある。プラズモンセンサでは、検出物の付着によるプラズモン共鳴スペクトルのシフトを利用する。プラズモンセンサは、蛍光分子によるラベルが不要、電場増強による高感度化、測定デバイスの小型化などの特徴をもつ。近年、「メタマテリアル」の登場によって、新しい原理をもつプラズモンセンサが提案された。メタマテリアルは、金属微細構造の形状・配置によって、自由にプラズモン共鳴を設計できる。メタマテリアルセンサでは、プラズモンによる「ファノ共鳴」を利用している。ファノ共鳴は、 $Q$  値が高く、大きなスペクトル変化が得られるため、わずかな屈折率変化を検出でき、単分子レベルの高感度センサが実現できる。

「ファノ共鳴光メタマテリアル」の最も大きな課題は、簡便かつ低コストに高性能な光メタマテリアルを作製する方法がないことである。これは、ファノ共鳴がナノ構造間の近接場による結合に依存しており、構造間のギャップを nm スケールで制御しなければならないためである。そのため、ナノインプリントやバイオテンプレートなどのスループットの高い手法では作製が難しく、電子線描画を用いる必要がある。これにより、作製時間・コストが増加し、応用への大きな障壁となっている。本研究では、この課題を克服するため、ナノ構造の精密な位置制御が不要な構造を提案する。これにより、ファノ共鳴をもちながら簡便かつ低コストに作製できる光メタマテリアルを開発する。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来と異なる原理のファノ共鳴を用いることで、ナノ構造の精密な位置制御を必要としない高性能なファノ共鳴光メタマテリアルの開発を目的とする。遠方場によるファノ共鳴を用いることで、ナノスケールのギャップ形成やナノ構造の位置制御の必要性を排除し、簡便かつ低コストな手法によるファノ共鳴光メタマテリアルの作製に挑戦する。また、高性能なファノ共鳴を得るための手法を開発することで、簡便な作製手法を用いながら、高性能なファノ共鳴光メタマテリアルの実現を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究のもっとも重要なアイデアは、「遠方場干渉によるファノ共鳴を用いること」である。申請者はこれまで、より単純な系でファノ共鳴を実現するために、長さの異なる 2 本の金属バーのみから構成される ADB (Asymmetric double bar) 構造を提案し、そのファノ共鳴が遠方場の干渉によるものであることを明らかにしてきた (図 1 (a))。近接場による結合を用いず、遠方場による干渉を用いることによって、ナノスケールのギャップを必要とせず、2 本のバー間の距離の変化によってファノ共鳴の有無が左右されない。この ADB におけるファノ共鳴を用いることで、単純な構造による高性能なファノ共鳴を実現する。

本研究では、(1) より簡便に作製する手法と、(2) センシング性能を向上させる手法の開発を行う。

#### (1) 化学的手法により作製された金ナノ構造による簡便な作製手法の開発

化学的な手法を用いることで、金ナノ粒子などの金ナノ構造を簡便かつ大量に作製できる。これらの構成要素を用いて ADB を形成できれば、描画技術フリーな光メタマテリアルを作製できる。そこで、本研究では、まず金属ナノ粒子からなる ADB 構造によって高性能なファノ共鳴が得られるかを、シミュレーションと実験によって調査する。

#### (2) 基板エッチングによるセンシング性能の向上

基板エッチングは、選択的エッチング技術を用いることで、基板上に形成された金属構造を破壊することなく、その下の基板のみをエッチングする技術である (図 1 (b))。これを用いることで、これまで利用できていなかった金属構造下部に局在するプラズモン電場を利用できる。それにより、ファノ共鳴メタマテリアルによるセンシング性能を向上させられる。本研究では、シリコン基板上に金からなる ADB 構造を形成した後、基板エッチングを行う。スペクトル測定により、分析物によるプラズモン共鳴シフトを観察することで、性能を評価する。

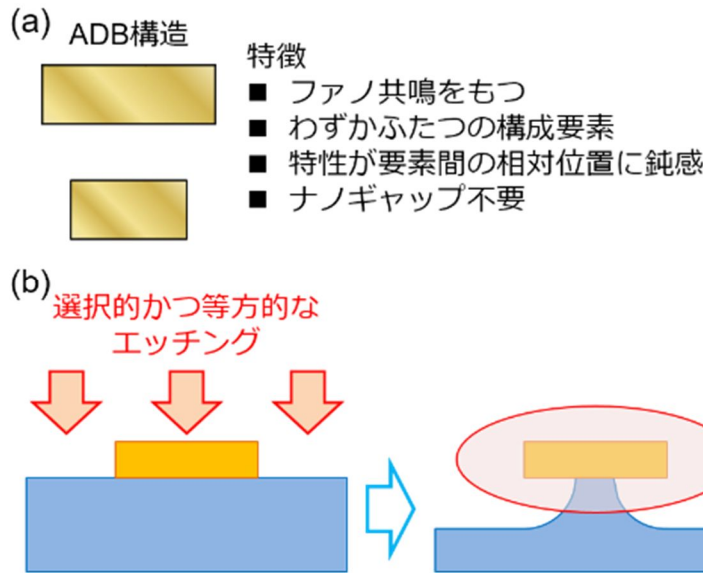


図1 (a)ADB 構造 (b)基板エッチング

#### 4. 研究成果

以下では、本研究で得られた成果について述べる。

##### (1) 化学的手法により作製された金ナノ構造による簡便な作製手法の開発

まずシミュレーションにより、円形構造によるファノ共鳴特性を、構造パラメータを変化させながら系統的に調査した。その結果、円形構造の場合でもファノ共鳴が発現し、そのQ値がバナー構造と比べた場合に大きく低下しないことがわかった。一方、構造周期を大きくした場合には、ファノ共鳴が消失してしまったため、ファノ共鳴の発現にはある程度の密度が必要であることがわかった。また、微細加工技術及び赤外分光測定を用いた実験により、円形構造によるファノ共鳴の観測に成功した。これらを踏まえ、金ナノ粒子を想定し、球形構造でのシミュレーションを行ったところ、球形構造ではファノ共鳴が発現しないことがわかった。これは、球形構造におけるプラズモン共鳴の共鳴スペクトル幅が広すぎるためであると考えている。そこで、金ナノ粒子ではなく金ナノロッドによる代替を検討するため、実際に市販されている金ナノロッドの形状を用いたシミュレーションを行った。その結果、ロッド構造ではファノ共鳴が発現することを確かめられた。

以上を踏まえ、市販の金属ナノロッドを購入し、シミュレーション結果の再現を試みた。光学スペクトル測定を行うために、顕微分光装置を構築した。単一の金属ナノロッドを石英基板上にスピコートし、スペクトル測定を行った。その結果、プラズモン共鳴ピークが得られたものの、その共鳴スペクトル幅が非常にブロードであることが確認された。これは、金ナノロッドの形状不均一性による不均一広がりの影響が考えられる。この結果から、金ナノロッドの単純な塗布では、高性能なファノ共鳴を得ることは容易でないことが示唆された。研究期間内に、複数の長さをもった金ナノロッドを塗布する実験を行うことができなかった。今後、塗布条件などを最適化した上で実験を行うことで、ファノ共鳴を観察できる可能性はあるが、高性能なファノ共鳴を得るには、単純な塗布では難しいと考えられる。

##### (2) 基板エッチングによるセンシング性能の向上

本項目では、シリコン基板上に電子線描画を用いて金からなるADB構造を形成し、基板エッチングを行った。基板エッチングにはICP-RIEを使用し、バイアス電圧を0にすることで、金構造のエッチングを抑えた。作製したサンプルに分析体としてPMMAを塗布し、それによるファノ共鳴シフトを測定した。その結果、基板エッチングによって、感度(nm/RIU)が8.3倍、FOMが3.4倍に向上することがわかった(図2)。この技術は、金属ナノ構造を形成した後に、付加的に適用することで、簡便に性能の向上が見込める技術であり、幅広い光メタマテリアル、プラズモニク構造に適用可能である。

また、基板エッチング技術は、もともとスプリットリングと呼ばれる構造を簡便に3次元化するための構造として開発されたものである。そこで本研究では、ADB構造から大きさの異なる3次元スプリットリング構造を作製する技術の開発とその特性評価も行った。その結果、光の電場だけでなく、磁場によっても励起可能な双異方性(bi-anisotropic)なファノ共鳴を実現できることがわかった(図3)。これは、複雑な電磁応答を示す系においてもファノ共鳴が制御できることを示しており、メタマテリアルを構成する基本要素として重要な意味をもつ。

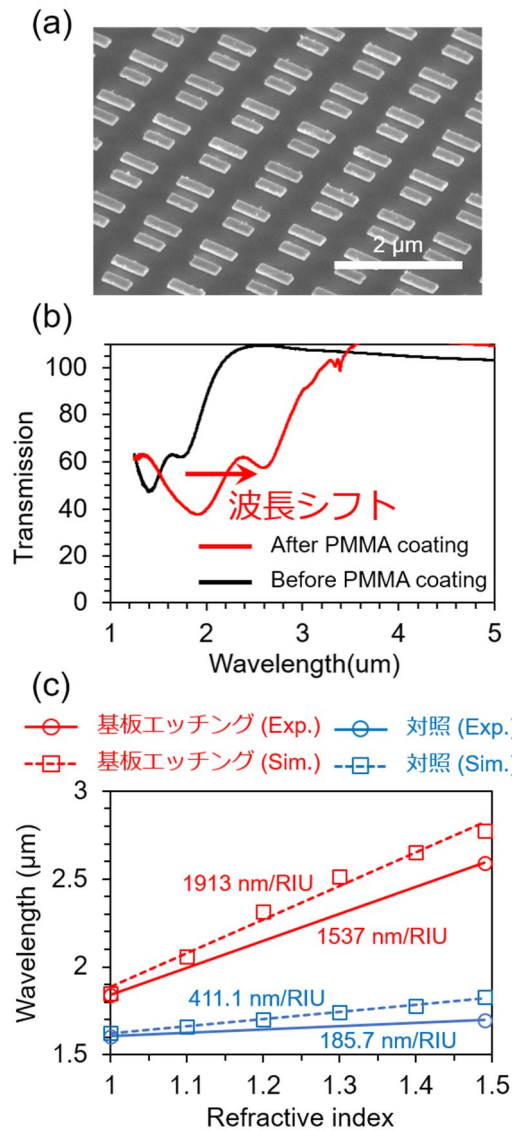


図2 (a)シリコン基板上に作製したADB構造 (b)PMMA塗布によるファノ共鳴波長シフト (c)基板エッチングによるセンシング性能の向上

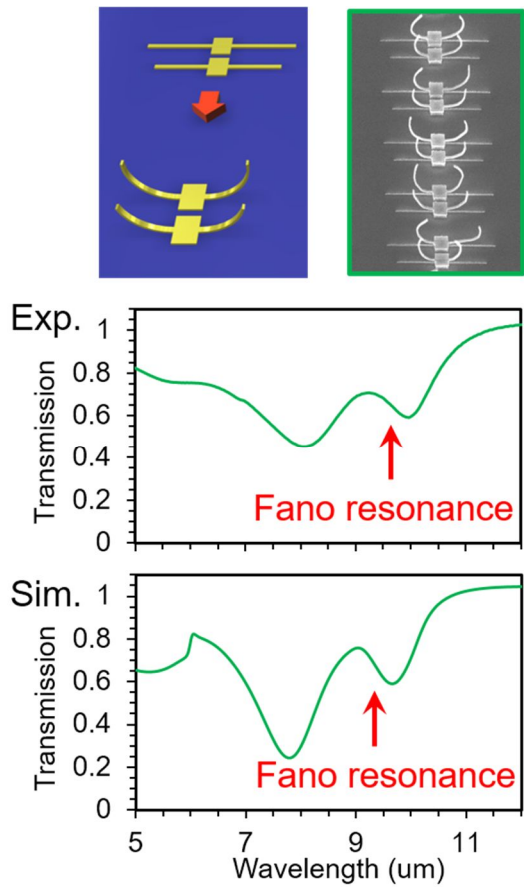


図3 3次元スプリットリングによる双異方性をもったファノ共鳴

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- [1] Y. Moritake and T. Tanaka, "Controlling bi-anisotropy in infrared metamaterials using three-dimensional split-ring-resonators for purely magnetic resonance," Scientific reports, 7, 6726 (2017). (査読有)
- [2] Y. Moritake, Y. Kanamori and K. Hane, "Dynamic Spectral Control of Fano Resonance by MEMS Actuated Optical Metamaterials," IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 137(11), 357 (2017). (査読有)
- [3] Y. Moritake and T. Tanaka, "Impact of substrate etching on plasmonic elements and metamaterials: preventing red shift and improving refractive index sensitivity," Opt. Express, 26(3), 3674 (2018). (査読有)
- [4] R. Mudachathi, Y. Moritake, and T. Tanaka, "Controlling coulomb interactions in infrared stereometamaterials for unity light absorption," Appl. Phys. Lett., 112, 201107 (2018). (査読有)
- [5] Y. Moritake and T. Tanaka, "Bi-anisotropic Fano resonance in three-dimensional metamaterials," Scientific reports, 18, 10125 (2018). (査読有)

〔学会発表〕(計4件)

- [1] Y. Moritake and T. Tanaka, "Bi-anisotropic response in three-dimensional split ring resonators fabricated by a self-folding method," The 8th International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META'17, Korea, July, 2017. (査読有)
- [2] Y. Moritake and T. Tanaka, "3D optical metamaterials for controlling electric, magnetic, and bi-anisotropic response," The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2018), Hangzhou, China, May, 2018. (査読有)
- [3] 森竹勇斗、田中拓男、「基板エッチングによるプラズモン共鳴波長の短波長化と屈折率センシングの高感度化」、第78回日本応用物理学会秋季学術講演会、福岡、2017年9月(査読無)
- [4] 森竹勇斗、「Optical applications using asymmetric-double-bar metamaterials」、第8回電磁メタマテリアル講演会、東京、2018年3月(査読無)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ: <http://notomi-lab.phys.titech.ac.jp/moritake/>

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

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。