

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2013

課題番号：24681033

研究課題名(和文) 金属サブ波長格子を用いたNEMS可変プラズモニックデバイスの開発

研究課題名(英文) Development of NEMS Active Plasmonic Devices Based on Metallic Sub-wavelength Grating

研究代表者

山口 堅三 (Yamaguchi, Kenzo)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：00501826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,400,000円、(間接経費) 6,420,000円

研究成果の概要(和文)：NEMSアクチュエータで変調可能な金属サブ波長格子を構成し、表面プラズモン(以下、SP)共鳴波長を電気信号で可変可能なアクティブプラズモンデバイス(以下、APD)を開発した。作製したAPDは、10 V以下のバイアス電圧で約60 nmの共鳴波長の可変化を可視光領域にて観測した。また、有限差分時間領域法を用いた数値計算より、本共鳴がSP共鳴であり、共鳴波長のシフトを定性的に明らかにした。さらに、Woodアノマリを用いた赤外光領域の共鳴波長の可変化の可能性を示した。これらのことから、単一試料・単一構造でSP共鳴波長を可変化可能なナノ光学制御技術を実現し、本技術を駆使した光学素子の開発に成功している。

研究成果の概要(英文)：We have developed an electrically driven plasmon chip i.e. active plasmon devices consisting of a metallic subwavelength grating modulated by a nano-electro-mechanical system (NEMS) type actuator. The device shifts the plasmon resonance wavelength and the transmittance when an electrical signal is applied. The fabricated filter shows the resonance wavelength shifts of 60 nm with a bias voltage of less than 10 V. Rigorous numerical calculation confirms origin of the surface plasmon resonance and qualitatively explains the effect. We show the resonant Wood's anomaly in the infrared region can also be spectrally shifted. Such NEMS optical devices offer rapid voltage-controlled plasmonic tuning of 20 MHz opening up applications in agile sensing and nanoscale object trapping using actively-tailored optical hot spots.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：アクティブ・プラズモニクス 表面プラズモン NEMSアクチュエータ 金属サブ波長格子 Woodアノマリ フィルタ センサ 導波路

### 1. 研究開始当初の背景

近年、LSI 技術と大容量光伝送技術を融合させた光電子融合技術が提案されている。表面プラズモン (Surface Plasmon: 以下、SP) は、光の回折限界以下の領域に光エネルギーを閉じ込めることから、光デバイスを CMOS 回路と同サイズに小型化する要素技術や高感度センサとして注目されている。

このような SP は、主にナノサイズの金属微粒子や金属微細構造において顕著に現れ、金属の種類やサイズ、形状、周囲の屈折率に依存した共鳴波長をもつ。近年の化学合成や微細加工技術の発展に伴い、SP 共鳴の原理や光学特性が明らかになる一方、その実用化には至っていない。このため、SP 共鳴波長を単一試料内で自由に可変することができれば、更なる小型や高集積、多機能化を実現し、多岐に渡る光学デバイスへの応用が単一試料・単一構造で可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究は、上述の研究背景を踏まえ、構造を自由に可動できれば SP 共鳴波長も連動して、変化すると考えた。そこで、微小電気機械システム (Nano Electro Mechanical System: 以下、NEMS) 技術を用いて、SP の動的光学特性を電氣的に制御可能なアクティブプラズモンデバイス (Active Plasmon Device: 以下、APD) の開発を目的とした。本研究では、APD の基礎的光学特性を解明し、ナノ光学の電氣的変調制御が可能な新たな光学デバイスを創製するものである。

### 3. 研究の方法

図 1 に、開発した APD の概念図を示す。APD は、金属格子を楕型 NEMS アクチュエータ機構で駆動するもので、金属の梁を両端で固定するアンカー部と弾性変形するサスペンション部、サブ波長格子となるグレーティング部から成る (図 1(a)参照)。金属グレーティングは、SP を励起するナノ構造として働き、共鳴波長を持つが、本構造に電圧を印加すると、グレーティングギャップ部に静電引力が働き、グレーティング部がたわみ、周期構造が変化することで SP 共鳴波長を自由に制御できる (図 1(b)参照)。

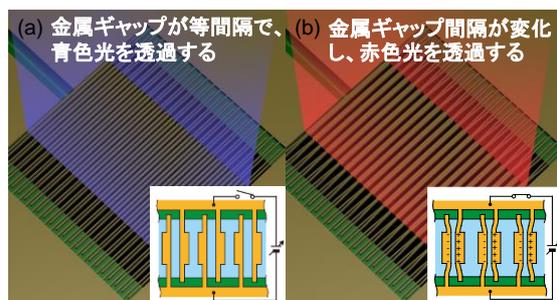


図 1. APD の概念図. 電圧印加 (a) 前、(b) 後

**試料形成**においては、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜基板上に金薄膜をスパッタ法により成膜した。次に、

集束イオンビームを用い、静電型 NEMS アクチュエータで変調可能な金属サブ波長格子を作製した。

**特性評価**においては、上記手順で得た試料の電圧依存透過光特性は、顕微分光光学系を構築して調べた。また、走査型電子顕微鏡で光学評価前後における構造を確認した。さらに、有限差分時間領域 (Finite-difference time-domain: 以下、FDTD) 法を用い、作製試料と同一条件下での数値計算を行い、実験結果と比較した。

**新規光学素子の創製**においては、電氣的制御による SP 共鳴の変調特性 (APD) の知見をもとに、フィルタやセンサ、導波路、シャッタや変調器、レンズなどを提案した。

### 4. 研究成果

#### (1) APD の基礎的光学特性

作製した APD の SEM 像と、その電圧依存透過光特性を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。図 2 の APD における一部のグレーティング部やサスペンション部、アンカー部の拡大図より、金線幅 ( $M_w$ ) と可変及び運動型の金属格子間のギャップ幅 ( $G_v$ ,  $G_e$ ) は、それぞれおおよそ 400 nm であり、弾性変形する金属サブ波長格子をアクチュエータ機構として可動可能な中空状の形成に成功した。

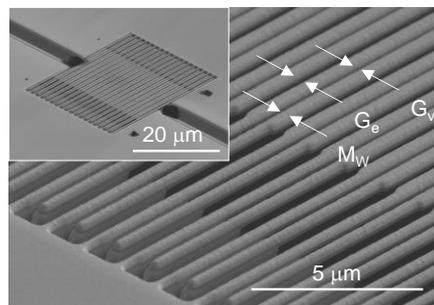


図 2 作製した APD の SEM 像.

図 2 の作製条件と同一な APD の 2 次元 FDTD 法により、( $G_v$ ,  $G_e$ ) の構造変化に伴い、共鳴波長のシフトを観測した (図 3 参照)。また、電界強度分布スナップショットより、本共鳴は SP に起因することを明らかにした。

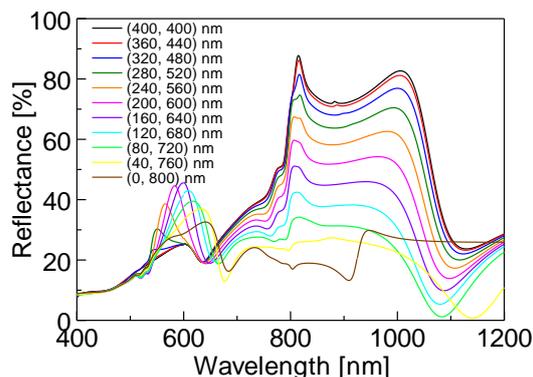


図 3 APD の反射光スペクトル (計算).

## (2) APD を用いた新規光学素子の創製

(1)で既述したように、電氣的制御による SP 共鳴変調が可能な APD の作製に成功し、その基礎的光学特性を数値計算により明らかにした。本項では、開発した APD の知見を基に、微細構造や光学特性の改善を図り、情報通信社会構築のためのキーテクノロジーとなる要素技術を構築する。

### (i) フィルタ

作製した APD の可視光領域における電圧依存 ( $V_B$ ) 透過光特性 (実験) を図 4 に示す。図より、波長 420 nm から 510 nm の領域に、共鳴ピークが得られており、 $V_B$  が大きくなるに従い、本共鳴ピーク波長のレッドシフトを観測した。本シフト量は、 $V_B$  に対応して単調に変化することから、金属サブ波長格子のギャップ間隔が電圧印加により変化したこと由来する。また、本光学現象が数値計算と定性的な一致を示しており、これは SP 共鳴に起因した。

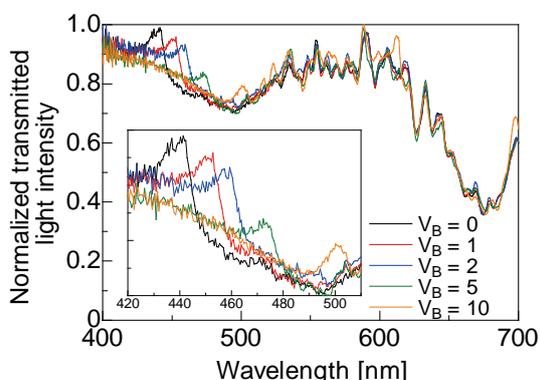


図 4 APD の透過光スペクトル(実験).

以上のことから、単一試料・単一構造で SP 共鳴波長を可変可能なナノ光フィルタを世界で初めて実現した。

### (ii) センサ

金属表面に 1 次元の周期的な凹凸を設けた回折格子では、ある特定方向の回折光の強度が失われる現象 (Wood アノマリ) が知られている。提案した APD においても、アノマリの条件は周期構造に依存するため、構造を可動できればアノマリの共鳴波長も連動して変化すると考えた (図 5 参照)。

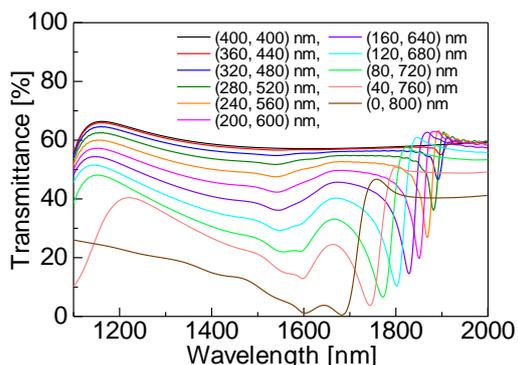


図 5 APD の構造依存赤外透過光スペクトル.

$G_v \neq G_e (\neq M_w)$  のとき、波長 1600 nm から 1900 nm 領域の透過光スペクトルにおいて、Wood アノマリ共鳴が得られた。また、波長 1800 nm 周辺の反射率が減衰する波長は、可変型ギャップ  $G_v$  が小さくなる (印加電圧が大きくなることに相当する) に従い、短波長側へ大きくシフトし、透過率も変化した。反射光スペクトルにおいても、同様な結果が得られた。さらに、図 5 で示すように、 $Q$  値が非常に高い共鳴波長のブルーシフトを観測した。以上のことから、本共鳴ピークは、( $G_v$ ,  $G_e$ ) の構造変化に伴い、波長シフトとその透過 (反射) 率が顕著に減少したため、Wood アノマリによる異常回折の可変性に成功したと考える。また、 $Q$  値が高いことから、マルチセンサとしての多様性に優れた素子になると期待される。

### (iii) 導波路

APD 技術と同様な発想で、NEMS アクチュエータ機構をギャップ型プラズモン導波路 (Gap Plasmon Waveguide: 以下、GPW) に適用し、外部変調で SP 共鳴波長の可変及び伝搬距離を制御可能なギャップ間の可変可能なアクティブギャップ型プラズモン導波路 (AGPW) を開発した (図 6 参照)。対向する金属ナノシートは、SP を励起し、伝搬する GPW 構造として働き、ギャップ由来の共鳴波長及びその伝搬距離を持つが、本構造に電圧を印加すると、金属シート部に静電引力が働き、金属シート上部よりたわみ、金属ギャップ間距離が変化し、SP 共鳴波長の可変及び伝搬距離を電氣的に制御できる (図 6 参照)。なお、シートたわみからギャップ端で集光効果も期待できる。

偏光依存透過光特性より、SP に由来した偏光特性を確認し、本構造に電圧を印加すると ( $V_B=10$  V)、共鳴ピーク波長のシフト (約 40 nm) を観測した。このことから、単一 GPW においても構造の可変性を実現することで、SP 共鳴波長の可変性と、その伝搬距離の電氣的制御を示した。

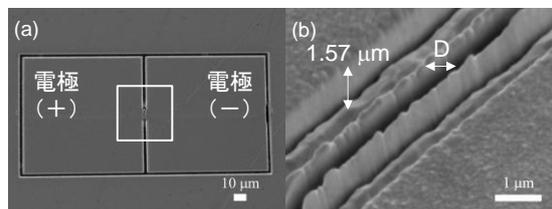


図 6 APW の SEM 像. (a)全体像、(b)可変部.

### (iv) その他

これまでの電氣的制御による SP 共鳴の変調特性に付随し、( $G_v$ ,  $G_e$ ) の構造変化に伴う光強度変調 (光シャッタ) や和及び差周波混合 (ビート成分) による光変調器、金属格子スリットを利用した作動距離の可変可能な光学レンズとしての新規光学素子への可能性を見出した。

最後に、APDの波長選択性と色再現性の更なる向上を図るため、蝶の構造色に着目した。ここでは、可視光領域での波長変調を実現するため、同領域全域に鱗粉を持つミヤマカラスアゲハ (*Papilio maackii*: 以下、*Pm*) 蝶に注目した(図7(a)参照)。つまり、本構造をAPDに適用すれば、SP共鳴波長の波長可変範囲を拡大できると考えた。*Pm*蝶の構造色は、鱗粉の表面(図7(b)及び(c)参照)と内部構造(図7(d)参照)に由来した。これらのことから、チップ表面に凹凸やリッジ(Rg)及び内部を多層膜に形成することで、光学特性の向上が期待される。

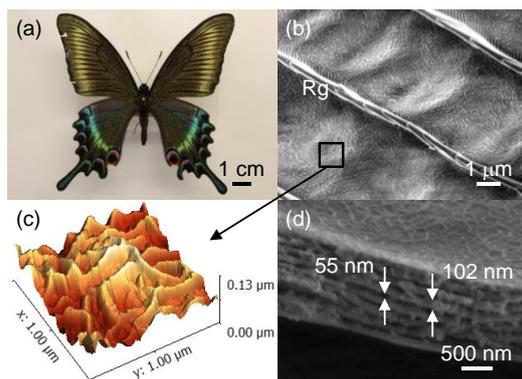


図7 *Pm*蝶の(a)実体像、鱗粉の表面形状の(b)SEM像と(c)AFM像及び断面SEM像(d)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

- (1) **K. Yamaguchi**, **M. Fujii**, **T. Okamoto** and **M. Haraguchi**, "Electrically driven plasmon chip: Active plasmon filter", *Appl. Phys. Express* **7** pp.012201 (2014)
- (2) **山口 堅三**, 『プラズモンチップ～次世代光電子集積デバイスから光センサ用材料としての可能性～』 *MATERIAL STAGE*(1) pp.64-67 (2014)

[学会発表](計57件)

- (1) **K. Yamaguchi** and **M. Fujii**, "Electric Field Characteristics of Active Plasmon Filter", *The 9th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics*, Ext. Abstr., pp.49-50, Singapore, July 4th, 2013
- (2) T. Ohtsu, **K. Yamaguchi** and **M. Fujii**, "Active gap plasmon waveguide", *The 6th International Conference on Surface Plasmon Photonics*, Ext. Abstr., p.357, Canada, May 27th, 2013
- (3) **K. Yamaguchi**, **M. Fujii**, **T. Okamoto** and **M. Haraguchi**, "Active plasmon filter", *The 12th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics and Related Techniques*, Ext. Abstr., pp.173, Spain, Sept. 6th, 2012

## [産業財産権]

○出願状況(計2件)

名称: プラズモン導波路素子、およびその作製方法

発明者: **山口 堅三**

権利者: 香川大学

種類: 特許権

番号: 特願 2014-99172

出願年月日: 2014年5月13日

国内外の別: 国内

先の出願に基づく優先権出張

番号: 特願 2013-102667

出願年月日: 2013年5月15日

名称: プラズモンチップ

発明者: **山口 堅三**、**藤井 正光**

権利者: 香川大学、国立高等専門学校機構

種類: 特許権

番号: 特願 2013-13308

出願年月日: 2013年1月28日

国内外の別: 国内

先の出願に基づく優先権出張

番号: 特願 2012-24619

出願年月日: 2012年2月8日

## [その他]

ホームページ

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~kenzo/>

## 受賞(計2件)

- (1) 優秀講演賞  
第18回知能メカトロニクスワークショップ、香川県産業技術センター、2013年8月28日
- (2) The Best Paper Award  
*Japan-India Bilateral Seminar on Supramolecular Nanomaterials for Energy Innovation*, Alpha Anabuki Hall, 15 Oct. 2012

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
山口 堅三 (Kenzo Yamaguchi)  
香川大学・工学部・助教  
研究者番号: 00501826
- (2) 連携研究者  
藤井 正光 (Masamitsu Fujii)  
鳥羽商船高等専門学校・電子機械工学科・准教授  
研究者番号: 00413790  
  
岡本 敏弘 (Toshihiro Okamoto)  
徳島大学・ナノテクノロジー研究部・助教  
研究者番号: 60274263  
  
原口 雅宣 (Masanobu Haraguchi)  
徳島大学・ナノテクノロジー研究部・教授  
研究者番号: 20198906