

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656237

研究課題名(和文) Woodの異常回折を取り入れたプラズモニクナノ光変調器の開発

研究課題名(英文) Development of Active Plasmon Modulator Using Wood's anomaly

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) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：次世代光電子融合技術の実現を目指し、マイクロサイズな誘電体微小球中での光共振現象であるWhispering Gallery Mode(以下、WGM)を介した光ヘテロダイン検出(WGM変調器)を提案し、観測に成功した。しかし、本技術は、入射光波長や球径、その屈折率に大きく依存しており、変調信号の自由度は極めて小さい。そこで、微小電気機械システム(以下、NEMS)技術を用いて、表面プラズモン(以下、SP)の動的光学特性を電気的に制御可能なアクティブプラズモンモジュレータ(以下、APM)を開発した。さらに、同様な発想を導波路に適用したアクティブギャッププラズモン導波路(以下、AGPW)を開発した。

研究成果の概要(英文)：We have developed an electrically driven plasmon chip i.e. active plasmon modulator 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 same holds for plasmon waveguide. We have also developed an active gap plasmon waveguide.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：アクティブ・プラズモニクス Woodアノマリ NEMSアクチュエータ 金属サブ波長格子 変調器 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。直径数 μm の微小球へある条件で光を入射すると、球内でほぼ全反射現象を繰り返し、位相の一致による共鳴モード (Whispering Gallery Mode: 以下、WGM) が励起できる。図 1 に示す 2 つの異なる波長を有した光 (波長 1569 nm と、波長を 100 MHz 周波数変調した入射光) を、2 つ異なる位置に配置した先球ファイバで微小球に入射し、WGM を介した光ヘテロダイン検出 (WGM 変調器) を提案した。中心周波数である 0.909 GHz でビート信号を、中心周波数より ± 101 MHz でサイドバンドをそれぞれ観測できたことから、WGM 変調器としての可能性を示した。しかし、これら WGM 共鳴波長は球径に大きく依存するため、入射光の波長や変調信号を変化させるのは困難である。

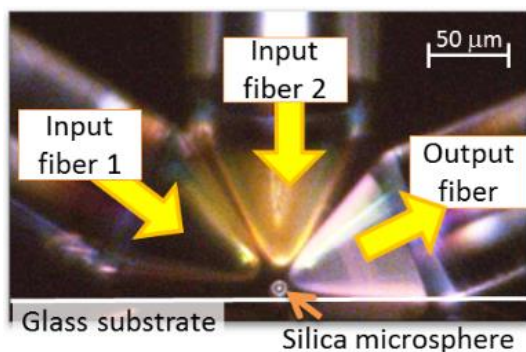


図 1 WGM 変調器.

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。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、単一試料・単一構造で可変可能なナノ光変調器が可能となる。

2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえ、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モジュレータ (Active Plasmon Modulator: 以下、APM とする) の開発を目的とした。

3. 研究の方法

試料形成 においては、 Si_3N_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。

図 2 に、開発した APM の概念図と SEM 像を示す。APM 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。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。

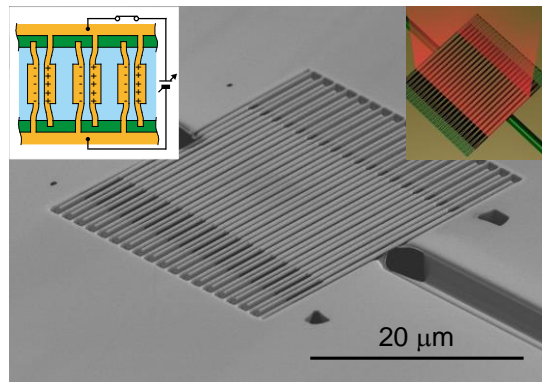


図 2 APM の概念図と SEM 像.

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。さらに、SP 共鳴波長である λ_1 と λ_2 ($\lambda_1 \approx \lambda_2$ であり、1GHz 程度のごく僅かな差) の 2 波長を同時に APM へ照射したときの透過の差周波数信号 (λ_3) を取り出し、APM の変調性能を評価した。

4. 研究成果

APM を作製し (図 2 参照)、単一試料で 60 nm の SP 共鳴波長の可変化に成功した。また、実験構造と同一モデルでの数値解析を行ったところ、光学特性は定性的な一致を示し、本光学現象は SP に起因することを明らかにした。さらに、これまでの電氣的制御による SP 共鳴の変調特性から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) による光変調器を実現した (未発表成果のため詳細を省く)。

一方、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3参照)。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3参照)。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。

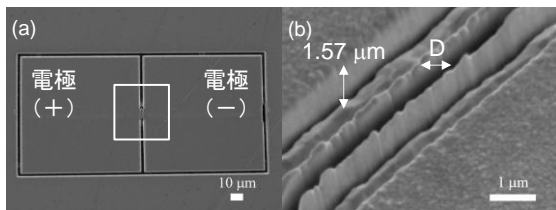


図3 APWのSEM像。(a)全体像、(b)可変部。

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($V_B=10\text{ V}$)、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共鳴波長の可変化と、その伝搬距離の電氣的制御を示した。このことから、本構造においても構造変化に伴う光シャッターや光ビート信号による変調器の可能性を見出した。

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) 研究分担者
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

(3) 連携研究者

岡本 敏弘 (Toshihiro Okamoto)
徳島大学・ソシテクノサイエンス研究部・助教
研究者番号：60274263

原口 雅宣 (Masanobu Haraguchi)
徳島大学・ソシテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号：20198906