

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13977

研究課題名(和文)ギャップ型プラズモン導波路の可変制御技術の開発とモニタリングセンサへの応用

研究課題名(英文) Mechanical control system for gap plasmon waveguide, and applications of a monitoring sensor

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、表面プラズモン(SP)を用いた光導波路の可変制御技術の開発とモニタリングセンサへの応用である。SPは、光の回折限界以下の光エネルギーの閉じ込めと、局所な電場増強効果より、センサの高感度化やデバイスの小型化の要素技術となりうる。これまでに、NEMSアクチュエータで金属サブ波長格子を構成し、電気信号で構造をメカニカルに制御することでSP共鳴波長を可変可能なアクティブプラズモンデバイスを開発した。同様な発想をSP導波路に適用することで、共鳴波長に加え、伝搬距離も可変できると考えた。本研究では、ギャップ型のSP導波路にこれらの知見を採用し、単一ナノ光導波路中での可変制御技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：Surface plasmons (SPs) can be efficiently excited in nanosized metal particles and structure, have a resonance wavelength depends on the conditions. Active plasmon filter consists of a metallic subwavelength grating with nano electro mechanical system (NEMS) actuator was developed the plasmon resonance wavelength to be shifted with an electrical signal. The same holds for plasmon waveguide. Therefore, the resonance wavelength and propagation distance would change in structure if the structural configuration of plasmon waveguide could be modified. This research proposes an active gap plasmon waveguide (AGPW) by forming a gap plasmon waveguide with a NEMS actuator and moving the metallic wall. When a voltage is applied to the structure, electrostatic attraction operates on the gap, deflecting the metallic walls and changing the structure. In this work, we fabricate an AGPW, and evaluate the optical characteristics with an electrical signal.

研究分野：プラズモニクス

キーワード：表面プラズモン 導波路 NEMS 静電アクチュエータ アクティブプラズモン メカニカルプラズモニクス 導

1. 研究開始当初の背景

金属/誘電体界面にある条件の光を入射すると、光と金属内の自由電子が相互作用し、結合した表面プラズモン (Surface Plasmon : 以下、SP) により、金属の薄膜や溝、粒子等のナノメートルサイズな微細構造に沿って伝搬する。このため、光エネルギーは、界面付近のサブ波長領域に局在し、サブ波長間隔の高密度配線が可能なプラズモン導波路 (Plasmon Waveguide : 以下、PW) を実現できる。SP は、回折限界を越えた集光も可能であることから、ナノサイズ光デバイスや光機能性分子への高効率光注入も期待される。国外では、通信波長帯域にてサブミリメートルの SP 伝搬を実証し、その後、能動化した研究が活発に行われている。国内においても、優れた先駆的成果を示す研究グループがあったものの、能動的な広がり狭く、実証実験は欧米に比べ遅れをとっている。

一方、サブマイクロメートルサイズの光導波技術として、フォトニック結晶やシリコンフォトニクスが注目されている。しかし、高密度光配線や大面積化が難しく、導波構造表面の平滑性や導波路幅の限界 (200 nm 程度)、発光素子との組み合わせが課題となっている。これに対し、PW は、伝搬距離が短いものの高密度配線やナノ空間領域への光集光、金属を利用した電子デバイスとの組み合わせ、光強度増強効果による非線形光学効果を用いた素子を実現している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面プラズモン (SP) を用いた光導波路の可変制御技術の開発とモニタリングセンサへの応用である。SP は、回折限界以下の光エネルギーの閉じ込めと、局所な電場増強効果より、センサの高感度化やデバイスの小型化の要素技術となりうる。これまでに、微小電気機械システム (Nano Electro Mechanical System : 以下、NEMS) から成るアクチュエータで金属サブ波長格子を構成し、電気信号で構造をメカニカルに制御することで SP 共鳴波長を可変可能な技術と素子であるアクティブプラズモンデバイス (Active Plasmon Device : 以下、APD) を開発した (基盤技術 1、引用文献①)。同様な発想を SP 導波路に適用することで、共鳴波長に加え、伝搬距離も可変できると考えた。本研究では、ギャップ型の SP 導波路 (引用文献②) にこれらの知見を採用し、導波構造であるギャップの可変制御を外部変調で実現する (基盤技術 2)。また、可変型 SP 導波路の特徴を活かし、歪みや表面分析センサシステムにおける技術体系の構築を目的とした。ここで、各々の基盤技術の産業財産権取得状況として、基盤技術 1 は 2017 年 2 月 24 日に特許登録された。(特許第 6094961 号)。一方、基盤技術 2 (特願 2014-99172) は、2017 年 4 月 3 日に審査請求を実施し、現在も審査中である。

3. 研究の方法

ギャップ型プラズモン導波路 (Gap Plasmon Waveguide : 以下、GPW。引用文献②) の可変制御となる概念図を図 1 に示す。図 1 より、2 枚の対向した金属シートから成るギャップに、電圧を印加すると、シート (ギャップ間) に静電引力が働き、たわむことで、ギャップの間隔が変化する。このため、ギャップを伝搬する SP は、印加電圧に依存し、構造が変化するため、共鳴波長とその伝搬距離も制御できる。

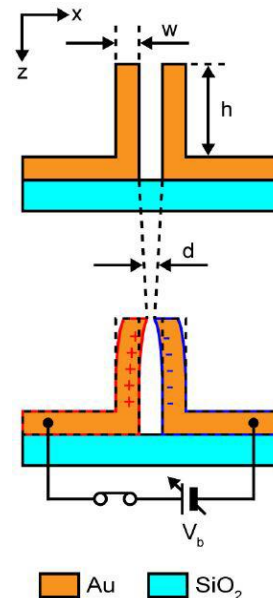


図 1 GPW の可変原理

本研究では、(1) 有限差分時間領域 (Finite-Difference Time-Domain : 以下、FDTD) 法を用いた光学現象の解明と構造の最適化を実施した。その後、(2) デバイスの作製および評価光学系の構築し、作製したデバイスの光学特性を評価した。さらに、(3) センサシステムの技術体系構築を目指し、ラボ・オン・チップファイバであるデバイスのファイバ体化システムを実現した。一方で、金属薄膜の質にも着目し、(4) 光性能およびその微細加工精度を飛躍的に向上できる成膜・転写技術を確立した。ここで、詳細な成膜および作製法ならびにファイバのエッチング条件等については割愛する。

4. 研究成果

(1) FDTD 法による原理解明

2次元 FDTD 法を用い、GPW のギャップ可変による光学シミュレーションを行った。PWG の透過光特性より、周期的な共鳴を観測し、これはギャップ間隔 (d) が狭くなる (電圧を印加することに相当する) に従い、長波長側へシフトした (図 2 参照)。さらに、電界強度分布より、本共鳴は、ギャップ端面である金属/空気と基板/空気界面間におけるファブリー・ペロー共振であることを明らかにした。

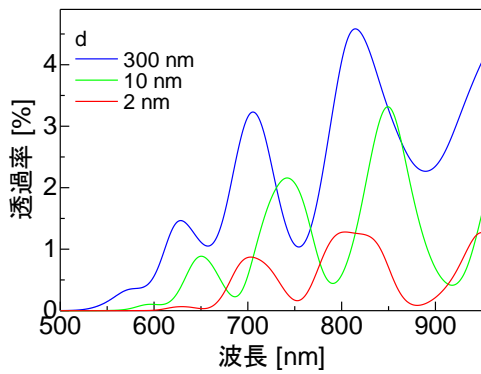


図2 GPWのギャップ依存透過光特性(計算)

(2) 可変 GPW の作製とその評価

作製した可変 GPW を図 3 に示す。可変 GPW は、2 枚の対向した金属シートとそれから成るギャップで形成、金属シートの厚みとギャップサイズは 200 nm と 300 nm で作製した(タイプ I)。作製した可変 GPW に TM 偏光を入射したときの透過光スペクトルより、光学シミュレーションと同様な複数の周期共鳴を観測した。また、これらは、印加電圧が大きくなるにつれ、共鳴波長のレッドシフトを観測した。本結果は、(1) で得られた FDTD 法の結果とも定性的な一致を示す。

可変 GPW をフリースタANDING構造にすることで、微細加工精度の向上を達成した。ここでは、金属シートの厚みとギャップサイズはそれぞれ 200 nm で作製した。これらの光学特性は上記と同様な結果が得られた。さらに、波長 632.8 nm による可変制御では、電圧を印加するに伴い、単一波長での光スイッチングを実現した。これは、これまでの SP 共鳴波長の可変に加え、伝搬距離の制御も可変 GPW の構造変調で実現できることを示唆する(5. 主な発表論文等[学会発表]③参照)。

(3) ファイバー体化システム

ゲルマニウムドープシングルモードファイバのエッチング条件を決定した後、ファイバ端面上への中空保持な可変 GPW を作製した(タイプ III、5. 主な発表論文等[学会発表]③参照)。現在、ファイバ端面上に基盤技術 1 と同様なデバイス作製に成功し、その外部変調駆動を実現している(タイプ IV、5. 主な発表論文等[学会発表]①参照)。さらに、MEMS 加工プロセスを取り入れることで、静電アクチュエータ≠導波デバイスを実現した(タイプ V、2017 年発表予定)。ここで、タイプ IV および V は、GPW と異なる導波構造であることから割愛する。

(4) 単結晶金属の成膜・転写技術の確立

従来のプラズモニクス分野では、金属薄膜の結晶性について十分な議論がなされておらず、多結晶金属薄膜の利用が一般的であった。近年、金属由来の光損失から、エピタキシャル成長を利用した単結晶金属薄膜が注

目される中、塩 (NaCl) の単結晶に着目し、これを基板とすることで基板上に成長させた単結晶金属薄膜のみを取り出す技術を開発した。

本成果を用いることで、基板選択の自由度が増し、従来困難であったガラスやペットフィルムなどの非晶質基板上における大面積な金属単結晶薄膜を実現している。また、微細加工精度や光学特性(光センシング能を含む)の向上をそれぞれ達成しており、将来的には、プラズモニックデバイスを実現するための金属薄膜の成膜基盤技術になると期待される。

なお、本研究成果は、2017 年 2 月 20 日 10 時(英国時間)に、英国の Nature 系電子ジャーナル「Scientific Reports」に掲載され、掲載当時の Impact Factor (IF) は 5.078 と総合科学分野で 5 位でした(5. 主な発表論文等[雑誌論文]①参照)。なお、2017 年 3

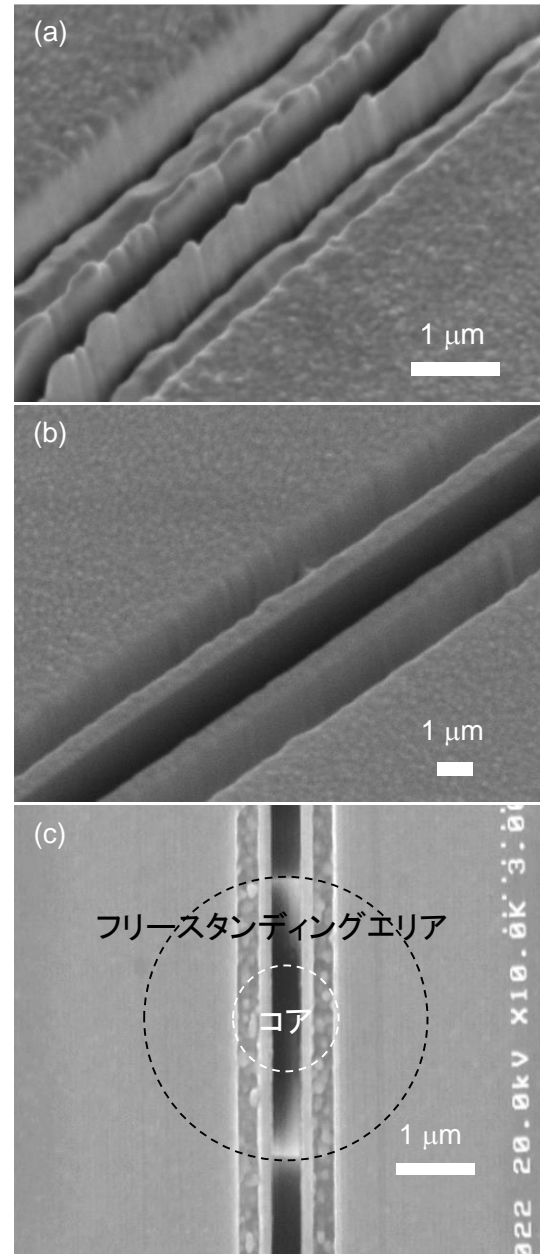


図3 可変 GPW の SEM 像. タイプ (a) I、(b) II、(c) III.

月にパシフィコ横浜で開催された第 64 回応用物理学会春季学術講演会や同年 5 月に台湾で開催されたプラズモニクスの専門国際会議 (SPP8, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics) にて本研究について発表した。

<引用文献>

- ① Kenzo Yamaguchi, Masamitsu Fujii, Toshihiro Okamoto, Masanobu Haraguchi, Electrically driven plasmon chip: Active plasmon filter, *Applied Physics Express*, Vol.7, 2014, p.012201 (4 頁)
- ② David Fujio Pelleas Pile, Toshiaki Ogawa, Dmitri K. Gramotnev, Yosuke Matsuzaki, Kristy C. Vernon, Kenzo Yamaguchi, Toshihiro Okamoto, Masanobu Haraguchi, Masuo Fukui, Two-dimensionally localized modes of a nanoscale gap plasmon waveguide, *Applied Physics Letters*, Vol.87, 2015, p.261114 (3 頁)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① Tomohiro Mori, Takeshi Mori, Yasuhiro Tanaka, Yoshifumi Suzaki, Kenzo Yamaguchi, Fabrication of single-crystalline plasmonic nanostructures on transparent and flexible amorphous substrates, *Scientific Reports*, 査読有, Vol.7, 2017, p.42859 (7 頁)
DOI:10.1038/srep42859
- ② Kenzo Yamaguchi, Hiroki Yamanaka, Tomoya Ohtsu, Satoshi Ishii, Electrically driven plasmon chip: Active plasmon lenses in visible, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol.108, No.11, 2016, p.111903 (4 頁)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4944537>
- ③ Tomohiro Mori, Yasuhiro Tanaka, Yoshifumi Suzaki, Kenzo Yamaguchi, Advanced fabrication of single-crystalline silver nanopillar on SiO₂ substrate, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol.108, No.4, 2016, p.043102 (5 頁)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4940439>
- ④ Tomohiro Mori, Kenzo Yamaguchi, Yasuhiro Tanaka, Yoshifumi Suzaki, Masanobu Haraguchi, Optical characteristics of rounded silver nanoprisms, *Optical Review*, 査読有, Vol. 23, No. 2, 2016, pp.260-264

DOI: 10.1007/s10043-016-0188-8

- ⑤ Kenzo Yamaguchi, Masamitsu Fujii, Electrically controlled infrared optical transmission and reflection through metallic grating using NEMS technology, *Applied Physics A*, 査読有, Vol. 121, No. 4, 2015, pp.1353-1357
DOI: 10.1007/s00339-015-9422-7
- ⑥ Tomohiro Mori, Yasuhiro Tanaka, Yoshifumi Suzaki, Kenzo Yamaguchi, Fabrication of silver thin film for single-crystalline nanopillar: effects of thickness and grain size, *Applied Physics A*, 査読有, Vol. 121, No. 4, 2015, pp. 1359-1363
DOI: 10.1007/s00339-015-9497-1
- ⑦ 山口堅三、藤井正光、石井智、鈴木孝明、岡本敏弘、原口雅宣、NEMS 技術を利用した可変プラズモンデバイスの開発、電気学会論文誌 E、査読有、Vol. 135、No. 11、2015、pp. 439-444
<http://doi.org/10.1541/ieejsmas.135.439>

[学会発表] (計 54 件)

- ① K. Yamamoto and K. Yamaguchi, Demonstration of active plasmonic device on an optical fiber, The 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, July 27th, 2017, Seoul (South Korea)
- ② K. Yamaguchi, T. Nakamoto, M. Ideue, D. Misawa, M. Fujii, and J. J. Baumberg, Multiple hotspots from Ag nanowire on mirror, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics, May 25th, 2017, Taipei (Taiwan)
- ③ K. Yamaguchi, T. Ohtsu, and M. Fujii, Electrically driven mechanical gap plasmon waveguide, Sep. 14th, 2016, Act City Hamamatsu (Shizuoka · Hamamatsu)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

○取得状況 (計 1 件)

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

番号: 特許第 6094961 号

取得年月日: 2017 年 2 月 24 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

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

報道関連情報

- ① 山口堅三 他、単結晶金属薄膜の転写技術とナノ光学における高性能化、プレスリリース、2017年2月20日
<https://research-er.jp/articles/view/55534>

受賞 (計3件)

- ① 山口堅三、分光によるナノ・マイクロ計測およびモニタリング技術の開発、源内奨励賞 (公益財団法人エレキテル尾崎財団)、2017年3月25日

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

藤井 正光 (FUJII, Masamitsu)
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

山本 和広 (YAMAMOTO, Kazuhiro)
九州大学・先導物質化学研究所・助教
研究者番号：40455449

(4) 研究協力者

Jeremy Baumberg FRS
University of Cambridge・Director of the Nanophotonics Centre・Fellow of Jesus College・Professor