

令和元年6月26日現在

機関番号：16201

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2018

課題番号：16KK0150

研究課題名（和文）メカニカルプラズモンデバイスを活用したナノ空間プラットフォームの構築（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Nano space platform technology for formulation of a mechanical plasmon device (Fostering Joint International Research)

研究代表者

山口 堅三（Yamaguchi, Kenzo）

香川大学・創造工学部・助教

研究者番号：00501826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、微小な空間をリアルタイムに制御し、かつその場の光計測が可能なメカニカルプラズモンデバイスを開発した。特に、400nmから15nmの空間を連続的に制御し、その光計測から動的な原理解明に繋がった。また、これと同時に、材料の光損失を極限に抑える結晶化技術を構築した。中でも、金と銀における単結晶膜の成膜法の確立とその転写による基板選択の自由度、ならびに検出感度の向上も実証しており、これらを用いた応用研究が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノフォトニクス研究、特にナノメートルスケールの量子プラズモニクスの第一人者であるBaumberg教授や再構成可能なメタマテリアルの第一線で活躍するZheludev教授らの研究内容は、本申請課題と直結するものであり、適切かつ迅速にキャッチアップすることで、国内外でも一目置かれる存在になり、追従を許さない成果を得たと確信している。今後、メカニカルプラズモンデバイスと基盤周辺技術を展開することで、多機能から高機能、そして「高性能」な光電子デバイスへの応用が期待できる。そして、新規な光・電子物性を発見するためのツール1つになるだろう。

研究成果の概要（英文）：Nano-dynamic and coupling plasmonic gap controlled by nano-electro-mechanical system actuator has become a precisely managing a resonances and field enhancements in nanometre scale. We demonstrated the mechanical plasmonic device consists of grating and wires can be changed structure using a sticking, and tuned coupling plasmon resonance by electrical signals, which in visible spectral bands. Approaching to control the space, we performed from 400 to 15 nm in gaps.

Otherwise, we demonstrate the fabrication of a low-loss singlecrystalline Ag nanostructure deposited on transparent substrates. Our approach is based on an epitaxial growth technique in which a NaCl (001) substrate is used. The NaCl substrate is dissolved in water to allow the Ag film to be transferred onto the desired substrates. Further, spectroscopic ellipsometry measurements indicated that the imaginary part of the dielectric constant of the single-crystalline film was smaller than that of a polycrystalline film.

研究分野：プラズモニクス

キーワード：表面プラズモン MEMS 単結晶 薄膜

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

金属に光を入射すると、金属内の電子と光の相互作用により、金属表面に光増強場である表面プラズモン (Surface Plasmon: 以下、SP) が発生する。SP は、ナノメートルオーダーの微小領域に光を局在させることから、光通信システムを始めとするナノ光デバイスや高感度センサとしての応用が期待されている。

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。しかしながら、既存の手法では、連続的な共鳴波長の制御が困難であった。近年、この共鳴波長を外部変調により動的制御可能な研究が次々と報告されている。研究代表者らのグループにおいても、2011 年より本研究に着手し、微小電気機械システム (Micro Electro Mechanical System: 以下、MEMS) 技術を用いて、SP の光学特性を電的に動的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) を開発した。これに伴い、ナノ光技術に能動的な革新的機能をもたらし、エネルギーや資源の効率化に寄与すると期待される。

2. 研究の目的

本研究は、先の 2015 年の科研費基盤研究 (B) である『NEMS 可変プラズモニックデバイスによる多機能光集積デバイスの創製』(研究課題: 15H03546) を基に、空間制御性を決定する微細構造の高精度な可変性を構造・材料から検討することで、ナノ光技術に能動的な革新的機能をもたらす、エネルギーや資源の効率化に寄与するものと位置づけ、『メカニカルプラズモンデバイスを活用したナノ空間プラットフォームの構築』をケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所ナノフォトニクスセンターの Prof. Jeremy John Baumberg, FRS の下で実施した。

本研究の目的は、空間制御に基づくリアルタイム計測・オンデマンド駆動なメカニカルプラズモンデバイスの創製と周辺技術の応用とした。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために、(1) メカニカルプラズモンデバイスの超精密空間制御および (2) 加工精度・光学性能の向上のための金属単結晶の成膜、をそれぞれ実施した。具体的な方法について、下記に示す。

(1) メカニカルプラズモンデバイスの超精密空間制御

研究開始当初より要対策事項と考えていた静電的な結合による固着現象 (スティッキング) について、発想転換を図ることでナノスケールでの連続的な空間制御を実現する。

(2) 加工精度・光学性能の向上のための金属単結晶の成膜

プラズモニクス分野において、金属の組織制御は、その後の加工精度や光学特性に大きく影響する。しかしながら、成膜サイズや基板材料の制約から確立した単結晶金属の成膜法が少なく、イノベーションへの展開に限られる。研究代表者らは、結晶基板上へ異なる材質の単結晶膜を成長させるヘテロエピタキシャル成長に注目し、塩 (001) の単結晶基板上に成膜した単結晶銀薄膜の基板を水に溶解させ、異種基板へ転写可能な成膜法を確立した (図 1 参照、*Scientific Reports* 7, 42859 (2017))。

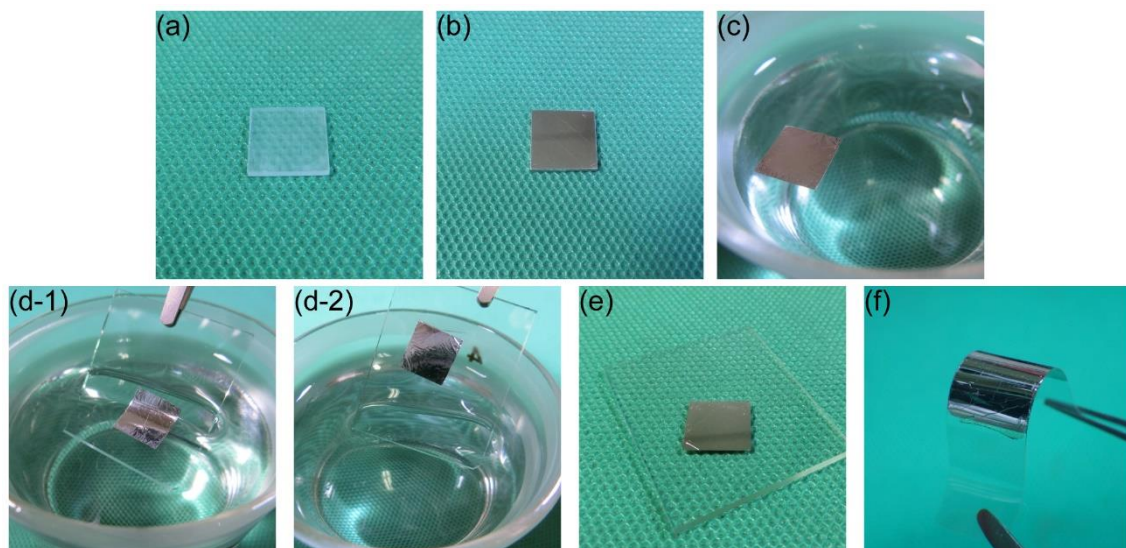


図 1 塩 (001) 基板を用いた単結晶銀薄膜の成膜法

4. 研究成果

本研究目的を達成するために、(1) メカニカルプラズモンデバイスの超精密空間制御および(2) 加工精度・光学性能の向上のための金属単結晶の成膜、をそれぞれ達成した。

(1) メカニカルプラズモンデバイスの超精密空間制御

要求に応じたナノスケールにおける連続的な空間制御に基づくリアルタイム計測とオンデマンド駆動を実現し、これにより、多種多様な測定を同時に達成した。

図2は、メカニカルプラズモンデバイスのSEM像を示す。図2より、中空に形成した金属格子(幅と長さがそれぞれ400 nmと50 μm)のスティッキングにより、スリット間隔が400 nmから20 nmへと空間的に連続的に変化する構造を実現した。本素子では、素子の外側から中心に向かうにつれ、スリット間隔が狭くなっているため、スリット幅に依存したSP共鳴波長および電場増強度を連続的に変化させ、各位置での情報を得た(未発表のため、その詳細は控える)。これを利用することで、分子や液体・ガスの流路センサ、ギャップ型からテーパ型プラズモン導波路としての多機能光素子への応用が期待される。

(2) 加工精度・光学性能の向上のための金属単結晶の成膜

成膜した単結晶および多結晶銀薄膜に微細加工した粒子とその表面増強ラマン分光計測により、単結晶銀粒子の成形が多結晶のそれよりも良く、これに加え5倍強いラマン強度を示すことを確認した。これは、分光エリプソメトリーによる薄膜の光学性能評価からも明らかであり、金属中のプラズモン損失に寄与する誘電率の虚部が多結晶のそれより30%も小さく表れたことから先のラマンとの相関性を示す(*ACS Applied Materials & Interfaces* **10**, pp.8333–8340 (2018))。さらに、粒形の光学特性について、有限差分時間領域法を用い、その最適な構造を見出した。

現在、銀に加え、金においても同様な単結晶薄膜の成膜法を確立している。今後は、これを用いた光半導体技術や医療、自動車、計測・検査分野などへの新機能性デバイスの創出など、その産業展開可能な成膜技術へと展開を図る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

1. Kenzo Yamaguchi, Tatsuki Nakamoto, Masamitsu Fujii, Optical Characteristics of Nano Space of Silver Nanowire on a Silver Mirror, *Electronics and Communications in Japan* • **102** • pp. 49–57 • 2019年2月
DOI: 10.1002/ecj.12166
2. 山口堅三, 中本樹, 藤井正光, 銀ナノワイヤと銀薄膜との微小空間における光学特性, *電気学会論文誌E* • **138** • 11 • pp. 509–515 • 2018年11月
DOI: 10.1541/ieejsmas.138.509
3. Shiho Ikegami, Kenzo Yamaguchi, Takuo Tanaka, Nobuyuki Takeyasu, Takashi Kaneta, Hydrophobic assembly of gold nanoparticles into plasmonic oligomers with Langmuir-Blodgett film, *Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communications)* • **57** • 12 • p. 120311 (5頁) • 2018年11月
DOI: 10.7567/JJAP.57.120311
4. Hiroyuki Okamoto, Kenzo Yamaguchi (equally contributed), Minoru Komatsu, Refractive index sensing at one wavelength via an active plasmonic device, *Journal of Nanophotonics* • **12** • 4 • p. 046011 (-頁) • 2018年10月
DOI: 10.1117/1.JNP.12.046011
5. Toshinari Ando, Takahiro Kaji, Kenzo Yamaguchi, Katsuyori Suzuki, Shun Kamada, Toshihiro Okamoto, Atushi Mori, Masanobu Haraguchi, MEMS plasmonic switch with stripe plasmonic waveguide, *Japanese Journal of Applied Physics* • **57** • 8S2 • p. 08PC02 (4頁) • 2018年6月
DOI: 10.7567/JJAP.57.08PC02



図2 SEM像

6. Tomohiro Mori, Takeshi Mori, Masamitsu Fujii, Yukihiro Tominari, Akira Otomo, Kenzo Yamaguchi (責任著者),
Optical Properties of Low-Loss Ag Films and Nanostructures on Transparent Substrates,
ACS Applied Materials & Interfaces • 10 • 9 • pp. 8333–8340 • 2018 年 2 月
DOI: 10.1021/acsami.7b18367
7. Nobuyuki Takeyasu, Kenzo Yamaguchi (equally contributed), Ryusuke Kagawa, Takashi Kaneta, Felix Benz, Masamitsu Fujii, Jeremy J. Baumberg,
Blocking Hot Electron Emission by SiO₂ Coating Plasmonic Nanostructures,
The Journal of Physical Chemistry C • 121 • 34 • pp. 18795–18799 • 2017 年 8 月
DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b02345

〔学会発表〕 (計 1 件)

1. Masanobu Haraguchi, Shun Kamada, Hiroyuki Okamoto, Toshihiro Okamoto, El-Zohary E. Salah, Kenzo Yamaguchi, Atsushi Mori,
Plasmonic resonator devices for integrated application,
Proceedings of SPIE • 10722 • p. 107220K (-頁) • 2018 年 9 月
<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10722/107220K/Plasmonic-resonator-devices-for-integrated-application-Conference-Presentation/10.1117/12.2320975.short?SSO=1>

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 2 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、国立高専機構

種類：特許権

番号：特許第 6094961 号

取得年：2017 年

国内外の別： 国内

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：特許第 6376830 号

取得年：2018 年

国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

徳島大学

<https://www.tokushima-u.ac.jp/>

徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所

<https://www.pled.tokushima-u.ac.jp/>

6. 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：Jeremy John Baumberg, FRS

ローマ字氏名：Jeremy John Baumberg

所属研究機関名：ケンブリッジ大学 (Univ. of Cambridge)

部局名：キャベンディッシュ研究所ナノフォトンクスセンター

職名：教授、センター長

研究協力者氏名：Nikolay I. Zheludev

ローマ字氏名：Nikolay I. Zheludev

所属研究機関名：サウサンプトン大学 (University of Southampton)

部局名：オプトエレクトロニクス研究センター

職名：教授、センター長

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：山本 和広

ローマ字氏名：Kazuhiro Yamamoto