

| | |
|--------------|---|
| Title | Nano-electromechanical control of plasmonic optical antennas |
| Author(s) | 宮田, 将司 |
| Citation | 大阪大学, 2016, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/55992 |
| rights | Copyright 2016 American Chemical Society. |
| Note | |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (宮 田 将 司)

論文題名

Nano-electromechanical control of plasmonic optical antennas
(ナノエレクトロメカニクスによるプラズモニック光アンテナの制御)

論文内容の要旨

Optical antennas are one of the most exciting frontiers in nanophotonics research owing to their unique optical property to concentrate light into deep-subwavelength volumes. This unprecedented ability has propelled their use in a wide range of important fields, including optoelectronic technology, spectroscopy, biomedicine, and sustainable energy. Embarking on these emerging applications relies heavily on modifying the fundamental properties of optical antennas. In this dissertation, we provide a powerful framework for dynamically manipulating the properties of optical antennas. By coupling an optical antenna to a metallic film through an air gap, the optical properties can be flexibly controlled through surface plasmon oscillations in the gap, while enhancing the unique ability of extreme light concentration. This feature allows manipulating optical antennas via nano-electromechanics capable of electrically and mechanically tuning the antenna geometry and thus its plasmonic characteristics. With a new strategy based on nano-electromechanics, we experimentally demonstrate that the resonant properties of optical antennas can be electrically modulated in the visible wavelength.

This dissertation starts with a discussion on the basic science of optical antennas in Chapter 1. In addition, we provide insight into the future progress of optical antenna. This is followed by Chapter 2, where we discuss how optical antennas can be designed with a desired set of optical properties. In Chapter 3, we leverage the developed design rule to modify the optical properties of a nanodisk-shape optical antenna coupled to a metallic film. Here, we demonstrate that the absorption properties modified by the antenna length can be encoded into a subwavelength-sized square of saturated reflected colors. The technical promise of this color generation for subwavelength color printing is illustrated by displaying microscopic letters in color as well as the feasibility for practical use. Besides resonance manipulation using the antenna length, the established intuitive model provides another insight into resonance tunability; control over the metallic gap would afford control over the resonance properties. These features generate considerable interest for achieving dynamic plasmonic functionalities via nano-electromechanics. To explore this possibility, in Chapter 4, we propose and demonstrate a new plasmonic resonator antenna that can be combined with nano-electromechanics. A suspended plasmonic nanowire (NW) coupled to a metallic film is introduced and a new fabrication technique: a pick-and-place method is developed to design such nanostructures. The optical resonant properties of the NW are then explored both experimentally and theoretically. The fundamental electromechanical properties of the suspended NWs are discussed in Chapter 5. In addition, we provide insight into the possibility of electromechanical control of plasmonic nanostructures. In Chapter 6, we finally present a detailed discussion of the dynamic resonance modulation of the suspended plasmonic NW with an electromechanical response. Following the characterization of both electromechanical and optical properties through numerical calculations, we provide an experimental demonstration of the electrical modulation of the optical resonant properties.

Overall, the results in this dissertation outline a path for manipulating the resonant properties of optical antennas. The demonstrated approaches allow modifying optical antennas flexibly and dynamically for a myriad of nanophotonic devices, including nanoscale optical and optoelectronic devices, color printing, filtering and display elements, and integrated sensors.

論文審査の結果の要旨及び担当者

| | | | |
|-----------------|-----|-----|------------------------------|
| 氏 名 (宮 田 将 司) | | | |
| 論文審査担当者 | (職) | 氏 名 | |
| | 主 査 | 教授 | 高原淳一 |
| | 副 査 | 教授 | 河田聡 |
| | 副 査 | 教授 | 井上康志 |
| | 副 査 | 教授 | 原口雅宣 (徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部) |

論文審査の結果の要旨

本論文は宮田将司氏が大阪大学大学院工学研究科に在籍中に行った研究の成果をまとめたものである。

本論文はイントロダクションと6つの章および結論から構成されている。イントロダクションではアンテナの歴史とその現代的な意義に続いて、本研究の目的と論文の構成が述べられている。1章では、光アンテナと表面プラズモンとの関連性について述べた後、光アンテナによる光制御とフォトニクスにおける応用が紹介される。2章は金属中の表面プラズモン・ポラリトン (SPP) のファブリ・ペロー (FP) 共振の原理に基づいた光アンテナの設計方法を提案し、これをテーパー型金属ワイヤーの光散乱実験に適用し、実験との良い一致が得られることを確認している。3章では光アンテナを利用したプラズモニックカラーの生成方法を提案している。2章で提案した光アンテナの設計手法を用いて反射スペクトルの設計を行い、実験を行ってプラズモニックカラーが実現できることを示している。4章では、金ナノワイヤーを金属基板上の中空に担持し、これに白色光を照射した場合の光散乱について調べ、FP共振による理論解析の結果について述べている。5章ではこのナノワイヤーを静電的に動かす方法を提案し、その力学特性の原理を紹介している。6章は5章に述べた原理に基づいて、金ナノワイヤーのナノ電気機械的制御を実際に行っている。基板とナノワイヤー間に電圧を印加し、静電引力によってギャップ間距離を変化させ、散乱スペクトルを変調できることを実験的に示している。結論では、これらの成果をまとめている。

光アンテナはプラズモニクスにおいて重要な分野であり、過去に多数の研究が行われてきた。そこでは、アンテナの共振条件は電波アンテナと同様に、半波長の整数倍としても大きな誤差はないとされてきた。しかし、光アンテナでは金属中に SPP が励起されることによって、有効波長が真空波長に比べて大きく縮小すると共に、端面反射においても無視できない位相シフトが生じるために、電波アンテナとの大きな差異が生じる。過去には、位相シフトについての理論的検討はあったものの、実験との比較において厳密な一致をみていなかった。

本論文では、光アンテナを SPP の FP 共振器とみて、端面の位相シフトをシミュレーションから定量的に求めることにより、厳密な共振条件を理論的に導く方法を提案している。さらに、この設計方法をもとに反射型メタ表面の反射スペクトルを設計し、従来のものより彩度の高いプラズモニックカラーの実証を行った他、金ナノワイヤーの光散乱実験のスペクトルを定量的に説明することにも成功している。申請者はピック&プレイス法とよばれる集束イオンビームを利用したナノプロセスを独自に開発し、これを用いて金ナノワイヤーを金属基板上の中空に固定し、光散乱スペクトルにギャッププラズモンに由来する FP 共振特性が得られることをはじめて見出した。さらに、ナノワイヤーに電圧印加することでギャップ間距離を制御し、ギャッププラズモンの共振特性を変調することに成功した。本成果はプラズモニクスとナノ電気機械システム (NEMS) の融合による光アンテナの新しい動的制御法を提案、実証したものと見え、アクティブ・プラズモニクスの発展に大きく貢献している。また、将来は低消費電力の光素子としての応用も期待できる。本成果は応用物理学、特に光アンテナの新しい応用の可能性を切り開いた点で高く評価される。

以上のように、本論文は光アンテナの NEMS による動的な制御方法を提案し、それを実現したといえる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。