

令和 2 年 2 月 12 日

電気・電子情報工学専攻	学籍番号	第 133235 号	指導教員	高橋 一浩
氏名	熊谷 隼人			澤田 和明

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	エラストマーナノシートを用いた伸縮性プラズモニックメタマテリアル
---------	----------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

近年、表面プラズモン共鳴を利用したプラズモニックメタマテリアルを多機能化する技術として、透過/反射スペクトルを動的に制御する技術が注目を集めている。その多くは、ゴム弾性を有するエラストマーの伸縮動作を利用し、AI サブ波長格子の構造周期に依存する分光スペクトル特性を機械的に変調している。伸縮性プラズモニックメタマテリアルは、様々な形状の構造物に貼り付けることでひずみの検出・視覚化を可能にする。また今後、微小電気機械システム(MEMS)との一体化により可変カラーフィルタが実現されることで、環境光を利用した超低消費電力な貼り付け型ディスプレイに向けた基盤技術として期待される。しかしながら、先行研究では膜厚 1 mm 以上のエラストマーを用いているため、MEMS の発生力では駆動が困難である。本論文では、動的変調機能を持つ MEMS 可変カラーフィルタに向けて、MEMS アクチュエータで駆動可能なサブミクロン厚の伸縮性プラズモニックメタマテリアルを製作し、表面プラズモンによる異常透過光を動的に変調することを目的とした。

基板から自立した高分子ナノ薄膜中にプラズモニックメタサーフェスを埋め込む構造を検討するため、半導体プロセスに成熟した poly(para xylylene) (parylene N)を用いて、基板貫通孔上に自立した 800 nm のプラズモニックカラーシートを試作した。parylene N に埋め込まれた AI サブ波長格子は 400-600 nm の格子周期で作分けられ、各周期に依存する五色の透過光の観測に成功した。

伸縮動作により透過光を変調するため、エラストマー材料の polystyrene-polybutadiene-polystyrene (SBS)をナノ薄膜化したシートを基板材料に用いることを検討した。SBS ナノシートの弾性変形を利用してスペクトル変調するため、光学機械特性より弾性変形の指標となるポアソン比を評価した。印加ひずみ 38%以下で算出された SBS ナノシートのポアソン比は、理想的なエラストマーに相当する 0.5 におよそ近い値が得られたため、ナノシート化された SBS においてもゴム弾性特性が実証された。

半導体プロセスに親和性のない SBS ナノシート上への金属微細構造の形成では、化学薬品やエッチングガスによる破断、超薄膜特有の高い凝着力による基板への貼り付き等が課題となる。本研究では、水溶性の poly(vinyl alcohol)犠牲層を介してバルク基板へ SBS ナノシートを一度貼り付

け、集束イオンビームによる金属の微細加工後にシートを剥離することで、自立膜状の膜厚 400 nm の伸縮性プラズモニックカラーシートを製作することに成功した。均一な格子周期変化を想定して作り分けたピクセルは格子周期 300-600 nm で製作し、可視光帯域の 439 nm-641 nm に及ぶピーク変化を示した。一方、シートの収縮評価では、ピーク波長シフトが 660 nm から 550 nm, 495 nm に及ぶ動的色彩変調を実証した。製作したシートの駆動力は、先行研究より 2-3 桁小さく、一般的な MEMS アクチュエータの発生力で十分に駆動可能であることが示唆された。

Date of Submission (month day, year): February 12th, 2020

Department: Electrical and Electronic Information Engineering		Contact faculty	Kazuhiro Takahashi Kazuaki Sawada
Applicant's name	Hayato Kumagai		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Stretchable Plasmonic Metamaterial using an Elastomer Nanosheet
-----------------	---

Approx. 800 words

Dynamic color tuning of transmission/reflection spectra has recently attracted attention as a multifunctional technology for plasmonic metamaterials using extraordinary optical transmission phenomena excited by surface plasmon resonance. Spectral characteristics depended on the structural period of metal subwavelength gratings are mechanically modulated by elastic deformation of an elastomer with rubber elasticity. Stretchable plasmonic metamaterials can be applied to structures of various shapes to enable strain detection/visualization. Besides, tunable color filters are realized by integration into micro-electro-mechanical-systems (MEMS), which are expected to be the fundamental technology of ultra-low power skin displays using ambient light. However, dynamic color tuning cannot be driven by a MEMS because of using an elastomer substrate with film thickness of more than 1 mm in previous works. In this study, a stretchable plasmonic metamaterial with a submicron film thickness was fabricated to demonstrate dynamic color tuning of extraordinary optical transmission by surface plasmon for a MEMS tunable color filter.

In order to realize a plasmonic color sheet embedded with plasmonic metasurfaces in a freestanding polymer nanosheet, an 800-nm-thick freestanding plasmonic color sheet above the substrate through-hole was fabricated using a poly(para xylylene) (parylene N) with compatibility with semiconductor process. All subwavelength gratings embedded in parylene N were separately fabricated with a grating period of 400-600 nm, and transmitted spectra of five colors depending on each period were successfully observed.

For demonstration of dynamic color tuning by sheet stretching, a nanometer-thick elastomer sheet using polystyrene-polybutadiene-polystyrene (SBS) with rubber elasticity was used as a substrate. In this study, the Poisson's ratio, which is an index of the elastic deformation, was evaluated from the opto-mechanical characteristics because the spectrum was modulated using the elastic deformation of the SBS nanosheet. The calculated Poisson's ratio of SBS nanosheets in the range of applied strain of up to 38% was approximately 0.5, which is equivalent to an ideal elastomer. Therefore, the rubber elasticity of SBS was demonstrated even for nanosheets.

The formation of metal nanostructures on the SBS nanosheet which is not compatible with semiconductor process involves problems such as breaking by chemicals or etching gas, and sticking to the substrate due to the high adhesive force inherent to ultrathin elastomer sheets. To solve them, the SBS nanosheet was once transferred to the bulk substrate via a poly(vinyl alcohol) sacrificial layer, and peeling off after focused ion beam milling. As a result, freestanding plasmonic color sheet with a thickness of only 400 nm was successfully formed. Color pixels with a grating period of 300 to 600 nm were separately fabricated assuming a uniform change in the grating period during expansion and contraction, and showed peak changes ranging from 439 nm to 641 nm in the visible light band. On the other hand, in the shrinkage evaluation of the sheet fixed to the movable stages, dynamic color tuning with a peak wavelength shift from 660 nm to 550 nm and 495 nm was demonstrated. The driving force of the plasmonic color sheet is two to three orders of magnitude smaller than that of previous work, which was suggested that typical MEMS actuator could be driven sufficiently.