

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13322

研究課題名(和文)伸縮性フィルム一体型MEMS静電駆動によるプラズモニック可変カラーシート

研究課題名(英文)MEMS plasmonic tunable color sheet by electrostatic actuator using stretchable thin film

研究代表者

高橋 一浩(Takahashi, Kazuhiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：90549346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では透明かつ伸縮性の薄膜上へアルミのサブ波長周期構造を形成し、表面プラズモン共鳴を利用した光の異常透過を利用することにより、高い透過率を持つ可変カラーフィルタを作製した。電圧印加により透過波長を制御することに成功し、さらに金属-誘電体-金属の積層構造を利用して、半値幅100 nm程度の波長選択性をもつカラーフィルタの作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed a highly transmissive color filter using surface plasmon-based extraordinary optical transmission which uses Al subwavelength periodic structures on stretchable thin film with high transparency. We demonstrated a tunable color filter by means of voltage control and high wavelength selectivity with full wave at half maximum of 100 nm using metal-insulator-metal structures.

研究分野：マイクロメカトロニクス

キーワード：表面プラズモン MEMS 有機デバイス 可変フィルタ

1. 研究開始当初の背景

情報化社会の進展や端末の小型・携帯化により、IT 機器の電力消費量は 2025 年には国内総発電量の 25% まで急増すると言われており (経済産業省)、デバイス消費電力削減は必須の課題である。電子デバイスの基盤技術のひとつである表示装置は液晶が主流であるが、光透過率が約 10% と低くバックライトでの消費電力が大きい課題がある。高い光効率を持つ技術として、アルミや金のナノ構造を周期的に配列し、表面プラズモン共鳴を利用して波長選択を行うプラズモニックカラーフィルタは 50~75% の高い透過特性を持つことが報告されている [Nat. Photon. 2, 161 (2008), Nano Lett. 14(2), 783 (2014)]. そこで先行研究例では検討されてこなかった波長可変動作の実現を目指し、申請者はこれまでにアルミナノワイヤの周期を拡張動作する MEMS アクチュエータを提案し、50% の高い透過率を実現した。この試作より、単画素で可視全域に変調帯域を持つためには 50% のひずみを必要とする設計指針が得られたため、本研究では伸縮材料上にプラズモニックナノ構造を形成し、ひずみを与えることにより可視光全域の色を高透過率で表示する可変カラーフィルタを製作することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究では透明かつ伸縮性の可動膜上へ金属のナノ構造を周期的に配列し、表面プラズモン共鳴を利用した光の異常透過を利用することにより、透過率 50% 以上を持つ可変カラーフィルタを作製し、高い光効率により表示素子の低消費電力化を目的とする。伸縮性カラーフィルムと集積化した MEMS 静電アクチュエータを用いて電圧駆動によるフィルムの 2 次元伸縮動作を行い、励起するプラズモンの波長を変調し、透過スペクトルを可視域 450~600 nm の範囲で制御を行う。さらに、可変カラーフィルタと支持基板を含む全構成要素をフレキシブル化し、本質的にペーパーライクな表示素子やウェアラブルディスプレイなどへの新たな応用展開を提供する革新的表示基盤技術を創出する。

3. 研究の方法

(1) プラズモニックカラーシートの作製

一般に、入射された伝播光の波数は表面プラズモンと一致することはない。しかし、表面プラズモンが金属格子周期による回折を受けると誘電体-金属界面においてエバネッセント場となるため、表面プラズモンと入射光とが共鳴的に結合してエネルギーの受け渡しが行われる。その結果、光の回折限界より狭いサブ波長金属周期格子においても光が透過する。このとき透過する光のピーク波長は以下の式で表される。

$$\lambda_{SPP} = \frac{\Lambda}{m} \sqrt{\frac{\text{Re}[\epsilon_m]\epsilon_d}{\text{Re}[\epsilon_m] + \epsilon_d}} \quad (1)$$

Λ は金属格子の周期、 m は回折次数、 ϵ_m と ϵ_d はそれぞれ金属の比誘電率と誘電体の比誘電率である。透過光の結合波長 λ_{SPP} は (1) 式に示すように金属格子周期 Λ に依存しているため、MEMS アクチュエータと一体化して周期を調整すると透過波長の変更が可能となる。プラズモニックカラーフィルタに金属周期を機械的に駆動させる機構を実装すると、従来のようなサブピクセルを必要とせずに、単一ピクセルで RGB カラーを表示可能なアクティブカラーフィルタが実現可能である。

図 1 に本研究で提案する表面プラズモンによるフレキシブルカラーフィルタの模式図を示す。従来のバルク基板に固定された表面プラズモンカラーフィルタと同様、材料の誘電率と金属パターンの形状パラメータを適切に設計することで、フレキシブル構造においても表面プラズモンによる異常透過光を得ることができる。今回の製作では、金属の周期ごとに別々なピクセルを用意して、周期は 400 nm から 600 nm まで 50 nm 刻みで設計した。アルミサブ波長格子の幅は全て 250 nm で統一している。これは、今後伸縮性シートに MEMS アクチュエータを実装して、シート伸縮により金属周期を変えて可変カラーシートを実現するためである。アルミサブ波長格子の高さは 50 nm である。底面のパリレン (500 nm) と上面のパリレン (300 nm) はアルミパターンを上下から挟む構造になっている。全体のシート膜厚は 800 nm である。

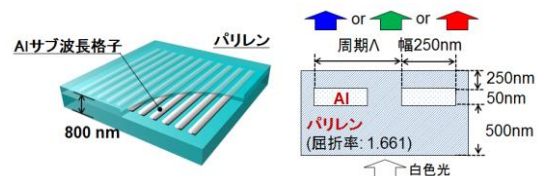


図 1 プラズモニックカラーシートの模式図

(2) エラストマー薄膜の光学機械特性評価

弾性変形領域がパリレンよりも 10 倍以上大きなエラストマー材料として、ポリスチレン-ポリブタジエン-ポリスチレン (SBS) トリブロック共重合体をナノ薄膜化したシートの使用を検討・評価した。バルクの SBS ブロック共重合体は、エントロピー弾性に基づく低弾性と伸縮性を有する弾性材料である。PDMS フィルムと異なる点として、SBS フィルムは構造エントロピーを増加させる相分離微細構造を持ち、ポリスチレン鎖・ポリブタジエン鎖がそれぞれのドメインを形成する。SBS を伸長するとポリスチレン鎖が核の役割をするのに対して、ポリブタジエン鎖は伸長されるためにエントロピーが減少する。外力を開放すると伸長されたポリブタジエン鎖が弾的に収縮し、著しいエントロピーの増加とともに安定状態に戻る。このエントロピーによる弾性は、一般的に半導体やパリレンのようなエネルギー弾性由来の材料の二桁以上も大きな変形を生じさせる。こ

のことから膜厚サブミクロンのエラストマーシートは、フレキシブルエレクトロニクス・MEMS デバイスの薄膜伸縮による制御機能の実現が期待できる。

SBS ナノ薄膜は、キャリアシートから犠牲層を介してナノシート層を剥離することで自立膜を形成する。犠牲層には水溶性ポリビニルアルコール (PVA) を使用した。SBS ナノシートをキャリアテープで固定し、温水中 (37 °C) で PVA 犠牲層を溶解することでナノシートを PET フィルムから剥離した。剥離した SBS ナノシートは、中心に 10 mm 角程度の基板貫通孔が空いた 20 mm 角の厚い PDMS シート上に転写し、SBS ナノシートの自立構造を製作した。この試料へ引張りひずみを印加することにより、SBS ナノシートの光学機械特性の評価を行った。

(3) MEMS 可変カラーフィルタの製作

サブ波長格子に MEMS アクチュエータを集積化した可変プラズモニックカラーフィルタを製作し、静電駆動による透過スペクトルの制御動作を評価した。EB 直接描画技術で形成したレジストを用いたリフトオフ工程によって Al 構造を形成する。その後 XeF₂ ガスによる Si エッチングで基板からリリースし、中空構造の可変カラーフィルタを製作した。製作したデバイスは、走査型電子顕微鏡 (SEM) 内で、可変プラズモニックカラーフィルタ駆動時の様子を観測した。駆動電極に直流電圧 0 V から 60 V まで 10 V 間隔で変化させ、サブ波長格子の周期測定を行った。

(4) MIM 構造による表面プラズモン光増強の検討

プラズモニックカラーフィルタの先行技術では、金属の間に誘電体を挟んだ MIM (Metal-Insulator-Metal) 構造を用いることによって、光透過率を向上させた報告がある [Nat. Commun. 1 (5), p. 59, (2010)]。プラズモニック可変カラーフィルタの動作実証後、MIM 構造を用いて可変カラーフィルタの効率向上を検討する。シリコン酸化膜をアルミで挟んだ MIM 構造を FDTD 法により解析したところ、透過率は 70~80% へ向上する見込みが得られている (図 2)。またこの構造においても、格子周期を拡張することにより可視光領域にピークシフトする可変カラーフィルタを実現可能である。

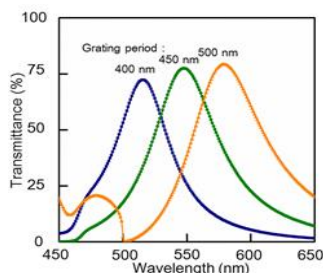


図 2 MIM サブ波長格子の透過波長特性

4. 研究成果

(1) プラズモニックカラーシートの作製

金属ナノ周期構造を高分子薄膜へ適用し、表面プラズモンを励起したフレキシブルカラーシートの原理検証を目的に、支持フィルムとして半導体プロセスを応用可能なポリパラキシリレン (パリレン) N を用いて膜厚 800 nm のカラーシートを作製した。格子周期は 400 nm から 600 nm まで 50 nm 刻みで設計を行ったもので、SEM 画像より製作時に生じた誤差は最大で 20 nm 程度であった。この原因としては、リフトオフ用パターン用の EB レジストが過現像により設計値より細くなったため、格子幅が広がったと考えられる。しかしながら格子幅は表面プラズモン共鳴波長に対して大きく依存するパラメータではないため、共鳴ピーク波長が著しく変化することはないと判断した。

フレキシブル表面プラズモンカラーフィルタの格子周期に依存した透過色の画像と透過光スペクトルを図 3 に示す。この透過色観察の測定では、カラーフィルタ裏面よりランダム偏光の白色光を入射している。透過型光学顕微鏡にマウントした CCD カメラで、格子周期 400 nm から 600 nm の画素を取得した結果、それぞれ青色・緑色・黄色・橙色・赤色の 5 色として明確に確認できた。取得した透過光スペクトルでは、格子周期 400 nm で 465 nm にピークを持っており、格子周期を 600 nm まで拡大することでレッドシフトするピーク波長は 655 nm まで達した。すなわち、200 nm の格子周期変化で 190 nm のピークシフトが得られたことになる。最大透過率は格子周期 600 nm のときで 60% であり、先行研究の表面プラズモンカラーフィルタで得られていた 20~30% より高く、これは高屈折率のパリレン層による干渉に起因していることが考えられる。一方でサイドバンドピークが発生していることが確認され、波長選択性が低いことが分かる。この課題は、先行研究で報告されている金属-誘電体-金属 (MIM) 構造を製作することで解決可能と考えられる。MIM 構造では、金属格子間のギャップで表面プラズモンによる電場増強が起こるとされている。よって、パリレンシ

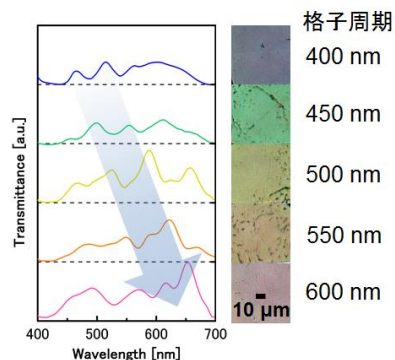


図 3 フレキシブル表面プラズモンカラーフィルタの格子周期に依存した透過色の画像と透過光スペクトル

ート中に MIM 構造を形成することで、リーク光を抑制可能であると考えられる。

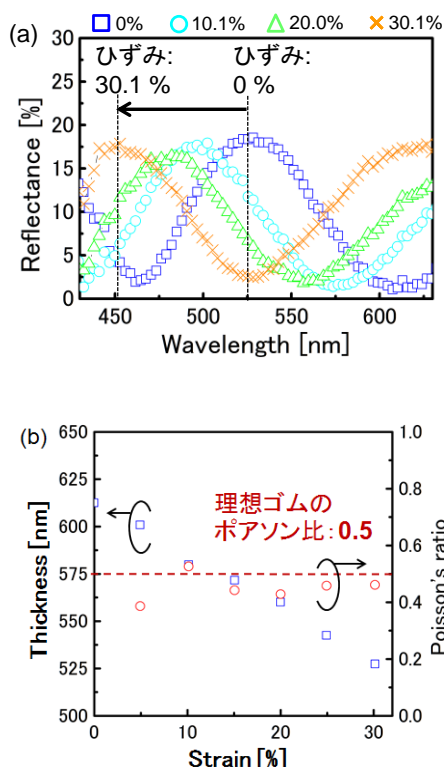


図 4(a)シート引張時の SBS ナノシートの反射スペクトル(b)算出したポアソン比

(2) エラストマー薄膜の光学機械特性評価

高分子薄膜の伸縮を利用した可変カラーフィルタを製作するため、ゴム弾性を有するナノ薄膜としてポリスチレン-ポリブタジエン-ポリスチレン(SBS)ナノシートを検討した。図 4(a)はシート引張時の SBS ナノシートの反射スペクトルである。初期状態においてナノシートの反射ピーク波長は 525 nm であった。30.1%のひずみを印加すると、525 nm のピーク波長が 450 nm までシフトした。この実験での最大印加ひずみは PDMS 基板の破断点に制限されており、SBS ナノシート自体にひずみによる欠陥はなく自立膜形状を維持していた。これより、SBS ナノシートは PDMS シート以上に弾性変形することが示唆された。図 4(b)は引張時の薄膜干渉ピークシフトより算出された SBS ナノシートの膜厚と、膜厚変化量と引張りひずみ量の比から算出されたポアソン比である。ひずみ印加試験においては、各ひずみを印加する度に一度初期状態になるまでシートを開放した。引張りひずみを印加したナノシートのポアソン比は 0.39~0.53 を示した。これはエラストマーの理想値に非常に近い。これより、ナノシート自立膜の弾性率はバルクのゴム材料に相当することが実証された。ここで得られた弾性ひずみは実験系の制約から 30.1%であったが、SBS 自体の弾性ひずみ領域はそれ以上

の値が期待されるものであり、表面プラズモンの励起波長変調に十分なひずみ領域を持つことが期待された。さらに、SBS ナノシート上へ最小線幅 250 nm、周期 350 nm の Al サブ波長格子形成を行い、ナノ周期構造の作製に成功した。以上より、高分子ナノ薄膜を用いたプラズモニックカラーシートの製作に成功し、貼り付け型表示素子の実現可能性を示した。

(3) アクチュエータの集積化と可変動作特性

プラズモニック構造の周期を拡張する MEMS アクチュエータの駆動特性評価のため、走査型電子顕微鏡中で電圧印加時のアルミサブ波長格子の周期拡張変化を観察した。直流バイアス 0 V 時の格子周期 498 nm から、60 V 印加時の 707 nm まで 209 nm の周期拡張を確認できた(図 5)。また、静電アクチュエータに駆動電圧を印加した際の表面プラズモンの励起波長シフトの実測値より、駆動電圧を 0 V から 60 V まで増加させることで励起波長はおよそ 520 nm から 640 nm まで連続的にシフトすることを示した(図 6)。さらに、得られた透過スペクトルピーク位置とサブ波長格子の周期変化より、両者には同様の傾向が見て取れるため、両者は比例関係にあることが示唆された。すなわち、可変プラズモニックカラーフィルタの励起波長シフトは格子変位に起因するものであると言える。

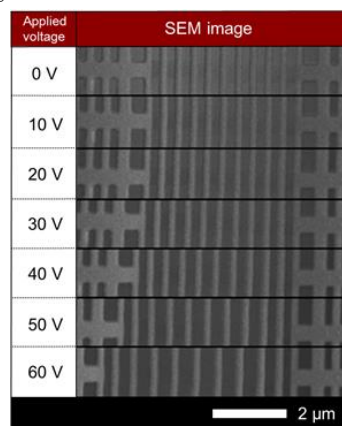


図 5 電圧印加により周期拡張させたサブ波長格子

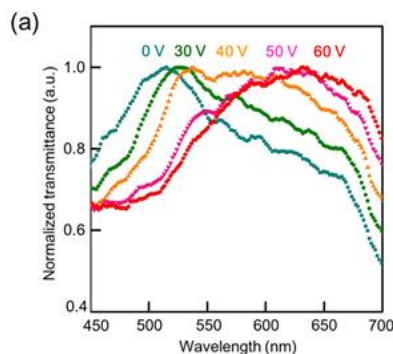


図 6 可変プラズモニックカラーフィルタの透過特性

(4) MIMサブ波長格子カラーフィルタによる波長選択性向上

アルミ層で形成したプラズモニック構造により、フレキシブルカラーシートと可変デバイスの作製に成功したが、波長選択性が低い点が課題であった。これを解決するために誘電体をメタルで挟んだ MIM 構造を作製し、波長選択性を評価した。Al、SiO₂、Al の膜厚をそれぞれ 50、150、50 nm、格子幅 250 nm とし、ガラス基板から 550 nm のエアギャップを介した自立構造の製作を行った。図 7 に製作した自立 MIM サブ波長格子 (格子周期 450 nm) の SEM 画像を示す。電子ビーム蒸着により Si/Al/SiO₂/Al を連続堆積させ、集束イオンビーム (FIB) を用いた Ga イオンエッチングでサブ波長格子を形成し、Si 犠牲層を XeF₂ ガスによる等方性エッチングを使って除去し、サブ波長格子をリリースさせた。図 8 に製作したフィルタの測定透過スペクトルを示す。格子の構造周期によって、透過光のピーク波長が 495 nm から 585 nm にシフトしていることが確認できた。さらに単一 Al カラーフィルタ上に見られる長波長側の光漏れを抑制する効果も確認できた。すなわち、自立 MIM サブ波長格子によるプラズモニックカラーフィルタの実現に成功し、これにより MEMS 可変フィルタの波長選択性改善することが期待できる。

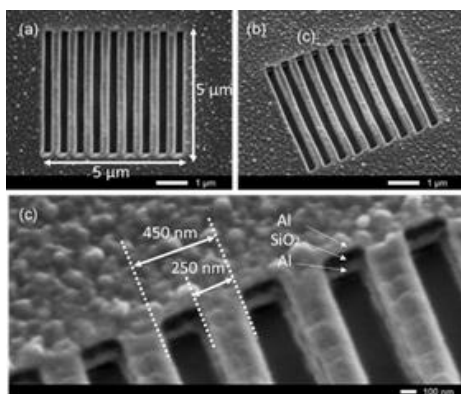


図 7 自立 MIM サブ波長格子フィルタ

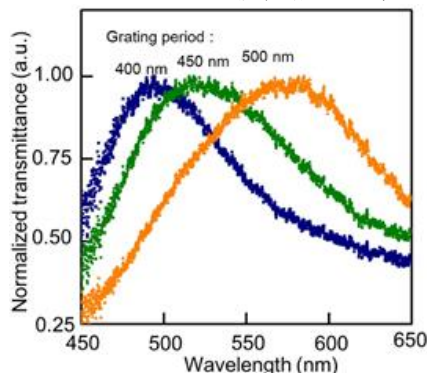


図 8 自立 MIM サブ波長格子フィルタの透過波長特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- [1] S. Itoh, K. Takahashi, H. Morita, K. Fukuzawa, and H. Zhang, "Measurement of viscoelasticity of UV photoresist used for nanoimprint lithography under confinement in nanometer-sized gaps," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 06GL02-1-5 (2017)
- [2] H. Honma, M. Mitsudome, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, "Nano-optomechanical characterization of surface-plasmon-based tunable filter integrated with comb-drive actuator," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 27, no. 3, 034001 (2017)
- [3] H. Kumagai, N. Sato, S. Takeoka, K. Sawada, T. Fujie, and K. Takahashi, "Optomechanical characterization of freestanding stretchable nanosheet based on polystyrene-polybutadiene-polystyrene copolymer," Applied Physics Express, vol. 10, no. 1, 011601 (2017)
- [4] H. Kumagai, H. Honma, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, "Fabrication of a thin plasmonic color sheet embedded with Al subwavelength gratings in parylene," Displays, vol. 45, pp. 63-69 (2016)
- [5] H. Honma, M. Mitsudome, S. Itoh, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, "Fabrication of free-standing subwavelength metal-insulator-metal gratings using high aspect ratio nanoimprint techniques," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 06GP20-1-5 (2016)
- [6] S. Itoh, K. Takahashi, H. Morita, K. Fukuzawa, and H. Zhang, "Atmospheric vapor phase deposition of nanometer-thick anti-stiction fluoropolymer coatings for silicon surfaces," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 06GP10-1-5 (2016)
- [7] H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "Continuously controlled excitation wavelength of surface plasmons by nanomechanical stretched subwavelength grating," Applied Physics Express, vol. 9, pp. 027201-1-4 (2016)

[学会発表] (計 17 件)

- [1] M. Mitsudome, K. Sawada, K. Takahashi, "Fabrication of plasmonic color filter by freestanding metal-insulator-metal gratings for MEMS tunable filter," IEEE 2017 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, to be oral presented.
- [2] S. Ito, K. Takahashi, K. Fukuzawa and H. Zhang, "Viscoelasticity of a Photoresist Used for Nanoimprint Lithography Measured Under Confinement in Nanometer-sized Gaps," 29th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC 2016), November 8-11, 2016, ANA

- Crowne Plaza Kyoto, Kyoto, Japan, 10D-6-5.
- [3] M. Mitsudome, H. Honma, K. Sawada and K. Takahashi, "A Tunable Plasmonic Color Filter by Nanomechanical Stretch using MEMS Electrostatic," IEEE 2016 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, 31 July-4 August 2016, Singapore, pp. 51-52.
- [4] H. Kumagai, N. Sato, S. Takeoka, K. Sawada, T. Fujie and K. Takahashi, "Fabrication and evaluation of freestanding stretchable nanosheet for optical MEMS application," IEEE 2016 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, 31 July-4 August 2016, Singapore, pp. 189-190.
- [5] M. Mitsudome, H. Honma, S. Itoh, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, "Fabrication of metal-insulator-metal sub-micron gratings by high aspect ratio nanoimprint," 28th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC2015), 10-13 Nov., 2015, Toyama, Japan, 12P-7-127L
- [6] M. Mitsudome, H. Honma, S. Itoh, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, "Highly Transmissive Plasmonic Color Filter by Free-Standing Metal-Insulator-Metal Subwavelength Grating," The 11th IEEE Int'l Conf. on Nano/Micro Engineered & Molecular Systems (NEMS 2016), 17-20 April, Matsushima Bay & Sendai, Japan, A3L-B-4.
- [7] H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "Widely tunable plasmonic bandpass filter integrated with Al subwavelength grating and comb-drive actuator," Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2016 (APCOT 2016), 26-29 Jun., 2016, Kanazawa, Japan
- [8] S. Itoh, K. Takahashi, H. Morita, K. Fukuzawa, and H. Zhang, "Atmospheric vapor phase deposition of nanometer-thick anti-stiction coatings of fluoropolymer for silicon surface," 28th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC2015), 10-13 Nov., 2015, Toyama, Japan, 12P-7-109.
- [9] H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "Fabrication of tunable plasmonic color filter using Al subwavelength grating integrated with electrostatic comb-drive actuator," Proc. 18th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers'15), 21-25 June, 2015, Anchorage, Alaska, USA, pp. 2053-2056.
- [10] 高橋一浩, 「微細構造による発色を利用した表示素子」, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 平成28年10月24日~26日, 平戸文化センター, 長崎, 30am2-PS-144.
- [11] 満留将人, 本間浩章, 石田誠, 澤田和明, 高橋一浩, 「MEMS 静電アクチュエータを用いたナノ機械伸縮による可変プラズモニックカラーフィルタ」, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 平成28年10月24日~26日, 平戸文化センター, 長崎, 25pm4-PS-112.
- [12] 熊谷隼人, 佐藤信孝, 武岡真司, 澤田和明, 藤枝俊宣, 高橋一浩, 「伸縮性ナノシート自立膜の製作および光学機械特性評価」, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 平成28年10月24日~26日, 平戸文化センター, 長崎, 24am2-B-4.
- [13] 熊谷隼人, 本間浩章, 石田誠, 澤田和明, 高橋一浩, 「パリレン薄膜を用いたアルミサブ波長格子によるプラズモニックカラーシートの製作」電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, 平成28年5月19-20日, 静岡大学
- [14] 本間浩章, 高橋一浩, 石田誠, 澤田和明 「MEMS 技術による表面プラズモン異常透過現象の励起波長連続可変制御」第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2016年3月19日~22日, 20p-S622-1.
- [15] 満留将人, 本間浩章, 伊藤伸太郎, 石田誠, 澤田和明, 高橋一浩, 「ナノインプリント技術を用いた金属-誘電体-金属サブ波長格子の製作」第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2016年3月19日~22日, 19p-S423-1
- [16] 本間浩章, 高橋一浩, 石田誠, 澤田和明, 「静電櫛歯アクチュエータを用いた表面プラズモン可変カラーフィルタの製作」, 電気学会E部門マイクロマシン・センサシステム研究会, 九州大学医学部百年講堂, 福岡, 2015年7月2~3日,
- [17] 熊谷隼人, 本間浩章, 石田誠, 澤田和明, 高橋一浩, 「金属ナノ周期構造を利用したプラズモニックカラーシートの製作」, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 機械振興会館, 東京, 2015年8月3~4日, 信学技報 vol.115, no.170, pp11-13.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: カラーフィルタならびにこれを使用する発光装置および表示装置

発明者: 高橋一浩, 本間浩章

権利者: 国立大学法人 豊橋技術科学大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2014-106462

出願年月日: 平成 26 年 5 月 22 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://int.ee.tut.ac.jp/icg/wp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋一浩 (TAKAHASHI, Kazuhiro)

豊橋技術科学大学・工学研究科・講師

研究者番号: 90549346