

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24710143

研究課題名(和文)集積化NEMS-LSI技術による高光効率・低消費電力可変カラーフィルタ

研究課題名(英文)NEMS-LSI-based tunable color filter with high optical efficiency and low power consumption

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) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造色を変化させるNEMS可変カラーフィルタへ、表面プラズモン共鳴効果を取り入れることで、高い透過率、低消費電力を特徴とする可変プラズモンフィルタの開発を行った。プラズマ周波数の高いアルミのナノワイヤを幅250 nmとし、周期を400 nmから600 nmまで格子周期の異なるカラーフィルタを作製した。透過スペクトルより、格子周期が450 nmから600 nmまで広げることで青色から緑色、黄色、赤色の透過光を確認した。TM波を入射し透過スペクトルを測定した際の透過率は最大56%であった。これはバルク基板に固定された従来の表面プラズモンカラーフィルタと同程度の透過率を実現した。

研究成果の概要(英文)：We have developed transmission color filters based on a subwavelength aluminum (Al) grating for NEMS variable color filter with high optical efficiency and low power consumption. An array of Al nanowires was deployed over a through hole. The subwavelength Al grating was patterned by EB direct writing and formed by liftoff technique. The peak wavelength of the transmitted light was red-shifted by increasing the gap of the subwavelength grating, and RGB color was expressed. The maximum measured transmitted light intensity of the peak wavelength was 56% which is equivalent value of conventional color filters fixed on a bulk substrate. The experimentally obtained peak wavelengths of the transmitted light agreed with the theoretical values. The proposed RGB color filters have potential application as tunable full color filters based on surface plasmon.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：MEMS/NEMS サブ波長格子 表面プラズモン カラーフィルタ CMOS-MEMS

1. 研究開始当初の背景

近年、高度情報化社会に向け表示装置への要求が高まっている。要求事項として小型・薄膜化、フレキシブル化、低消費電力化等がある。特にポータブルディスプレイの普及によりバッテリー寿命を長くするための低消費電力化が強く求められている。現在の表示装置の主流である液晶素子はバックライトの透過率が10%程しかなく、バックライトで多くの電力を消費してしまう。このため、液晶素子とカラーフィルタの機能を合わせた透過率の高い可変カラーフィルタが求められている。

高い透過率が得られる現象として、表面プラズモン効果が知られている。表面プラズモン効果による異常透過は、サブ波長の金属格子表面に光が入射すると、その周期構造に起因する表面プラズモンが励起され格子ギャップを透過することができる。格子周期より長い波長を持つ光は格子ギャップを通過することができないため、サブ波長の金属格子はフィルタとして機能する。これにより、金属の格子周期を任意に設定した表面プラズモンカラーフィルタが報告されている。これまで報告されている表面プラズモンを用いたカラーフィルタは基板上にナノ構造が固定されていたため、可変機構を組み込んだ取組みはなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、サブ波長格子のナノギャップを静電的にコントロールし構造色を変化させる NEMS (Nano Electro Mechanical Systems) 可変カラーフィルタへ、表面プラズモン共鳴効果を取り入れることで、高い反射・透過率を持ち、高速動作、低消費電力を特徴とする可変プラズモンフィルタの開発を目的とする。半導体微細加工技術により作製した NEMS アクチュエータは集積回路基板上に一体化が可能で、構造色を可変とする集積化 NEMS カラーフィルタの作製に向けた検討も行う。駆動回路により NEMS アクチュエータのナノギャップをアナログ動作させ、可視領域全域を表現する可変カラーフィルタの実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) シリコン NEMS アクチュエータの低電圧駆動

① 可変フィルタの設計

図1にサブ波長格子を用いた透過型可変フィルタの構造図を示した。Siブリッジの格子3本で1組の平行平板静電アクチュエータをナノギャップを持たせて並べることでサブ波長格子を構成している。1組の平行平板静電アクチュエータの中央の格子は駆動電位を印加した静止格子、両端の格子は GND 電位を印加した可動格子である。可動格子は電圧を印加することで格子ギャップに発生する静電引力により静止格子に引き寄せられ、サブ波長格子の格子ギャップを変化させる。これにより導波モード共鳴波長が変化する。このデ

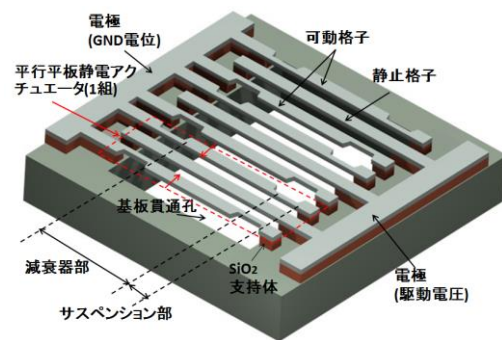


図1 透過型 NEMS 可変フィルタの模式図

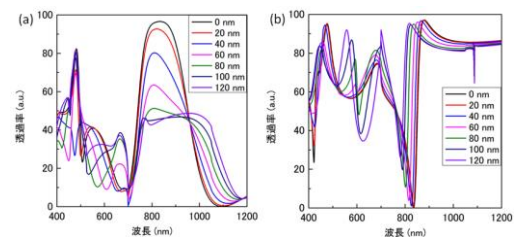


図2 可動格子の横方向変位に対する透過率変化の解析結果(RCWA) 入射波 (a) TE 波 (b) TM 波

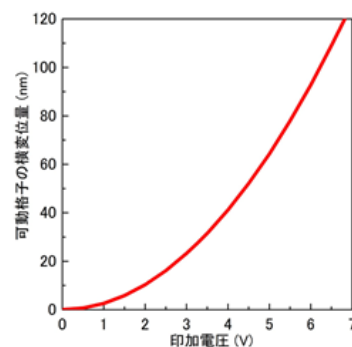


図3 印加電圧に対する可動格子の横方向変位量の解析結果

バイスでは駆動時に2重の周期構造を形成する。2重周期構造を持つサブ波長格子による導波モード共鳴効果は既に報告されており、1つの周期構造を持つサブ波長格子に比べ共鳴現象を発生させる入射光の許容角が増加する特性を持つ。各格子の両端は SiO₂ のアンカーにより基板に固定され、格子中央部を中空構造にしている。サブ波長格子は中央のフィルタ部と両端のサスペンション部により構成されている。サスペンション部は駆動時に弾性変形しやすいうように減衰器部と比べ細くし、設計時に格子ギャップに差を与えることで静電引力による可動格子の変位方向を指示している。

図2に提案するサブ波長格子を用いた透過型可変フィルタの透過光スペクトル変化を、RCWA(Rigorous Coupled Wave Analysis)法を用いた光学解析シミュレーション結果を示した。図2(a)は入射波として TE 波を、図2(b)は TM 波を垂直入射している。TE 波は格子の溝に対して電界を平行と考えている。透過

光スペクトルは 0 次光を示した。サブ波長格子の設計値は、Si 格子幅 340 nm、格子ギャップ 360 nm、格子厚さ 110 nm、フィルタの長さを 30 μm、サスペンション部の長さを 10 μm とした。可動格子を 0 nm から 120 nm まで横方向変位させたとき、TE 波では波長 800 nm で透過光は 52% 減衰した。TM 波では 880 nm の透過ピークが約 60 nm 短波長側へとシフトした。これより、提案したサブ波長格子の格子ギャップを変化させることで TE 波では波長 800 nm 付近で大きい減衰、TM 波では透過ピークシフトを得ることが可能であることが分かった。入射光としてランダム偏光を入射した場合、透過型可変フィルタの駆動により波長 800 nm 付近で減衰効果が得られると考えられる。

図 3 に 3 本で 1 組の平行平板静電アクチュエータの印加電圧に対する可動格子の横方向変位量を、ANSYS を用いた構造解析により示した。3.3 V の電圧を印加した際、可動格子の 28 nm の横方向変位が得られ、駆動電圧 5 V で 64 nm 横方向変位することが分かった。また、共振周波数は 733 kHz と算出された。これより 3.3 V でも透過光に数 10% の減衰効果を与えることが可能であることが分かった。これらより、提案したサブ波長格子を用いた透過型可変フィルタは標準 CMOS を用いて数 10% の減衰効果と 1 MHz 程の高速動作が期待できる。

②可変フィルタの製作方法

製作には Top-Si 層の厚さ 110 nm、BOX(buried oxide)層 1 μm、Si 基板 200 μm の SOI(silicon on insulator)基板を使用した。裏面エッチングマスクとして Plasma-SiO₂ 膜を裏面に 2 μm 成膜した。次に EB(electron beam)レジスト(ZEP520A-7)をスピコートにより Top-Si 上に塗布し、EB 直接描画法(JEOL JBX6300DA)により加速電圧 25 kV、ドーズ量 40 μC/cm² で露光し、EB レジストをサブ波長格子状にパターンニングした。ICP-RIE(inductivity coupled plasma- reactive ion etching)装置によりボッシュプロセスを用いて EB レジストをエッチングマスクとして Top-Si 層をサブ波長格子状にエッチングした。ガスは SF₆ と O₂、C₄F₈ ガスを用いた。微細格子のエッチングにボッシュプロセスを用いたのはサブ波長格子に垂直性を持たせ光学効果を向上させるためである。表面保護膜として Parylene-N (poly-para-xylylene) を 600 nm 堆積させた。フィルタ下部の Si 基板を Plasma-SiO₂ をエッチングマスクとして Deep-RIE により Si 基板 200 μm を垂直にエッチングした。この際、BOX 層をエッチングストップパとした。BHF(Buffered HF)により BOX 層をエッチングした。最後に Parylene-N を O₂ プラズマにより除去した。これにより基板貫通孔上へサブ波長格子の中空構造を形成した。

(2) 表面プラズモン共鳴を用いた広変調帯域カラーフィルタ

①表面プラズモンフィルタの設計

アクチュエータによるサブ波長格子の動作時に、微小な機械的変位に対して、大きな波長シフトが得られることを目的に、表面プラズモン共鳴を利用したアルミサブ波長格子の製作を行った。アルミのナノワイヤを一定の周期で基板貫通孔上に形成しサブ波長格子を構成しており、MEMS アクチュエータにより駆動可能とした。白色光は裏面より入射する。表面プラズモンの異常透過による透過ピークの波長は式(1)で示される。

$$\lambda_{max} = \frac{\Lambda}{m} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)より透過ピーク波長は格子定数を決定する格子周期 Λ で与えられる。m は次数、ε_m と ε_d はそれぞれ金属格子の誘電率と周囲の誘電率である。よって、提案する表面プラズモンカラーフィルタでは金属格子の幅を一定にし、格子周期のみ変化させることで、静電アクチュエータにより格子周期を動かしたと仮定する。静電アクチュエータは数 μm の可動範囲を持ち、格子周期を一定に変化させることが可能である。また、アルミはプラズマ周波数が高く、青色まで再現可能である。さらに損失が小さく、加工の容易さや CMOS プロセスとの整合性を持っているためサブ波長格子の材料にはアルミを選定した。

Finite-Difference Time-domain Method (FDTD) シミュレーションを用いて透過スペクトルを算出することで透過型表面プラズモンカラーフィルタの設計を行った。図 4 に FDTD シミュレーションにより算出した透過スペクトルを示した。アルミの屈折率と消費係数はドルーデモデルを用いて算出した。グリッドサイズは x=5 nm、y=5 nm、z=2 nm で設定した。アルミの格子幅を 250 nm、厚さを 100 nm、格子周期を 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm の 4 種類設計し計算した。光は TM 波を裏面より入射し、電界は格子の溝に対して垂直の向きとした。図 4 に示すように、格子周期 450 nm のカラーフィルタは透過ピーク波長が約 490 nm、格子周期 600 nm のカラーフィルタは約 630 nm であり、格子周期を大きくすることで透過ピークが長波長側へシフトしていることが分かる。また、150 nm と小さい格子周期の変化により可視光全域の色を示せることが分かった。得られた透過率は約 60% 程度であり、液晶を上回ることが予想される。透過ピーク以外のサイドバンドが約 20% と高いが、透過ピークとの差は先行研究例の表面プラズモンカラーフィルタと同程度であるため、同等の色の発現が期待できる。

② 表面プラズモンフィルタの製作方法

製作には 280 μm のシリコンウェハを使用

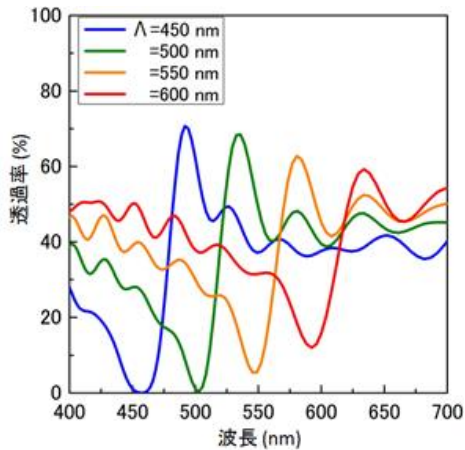


図4 FDTDシミュレーションを用いたTM波を入射した際の表面プラズモンカラーフィルタの透過スペクトル

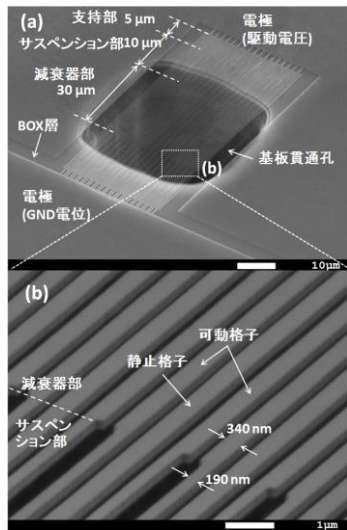


図5 (a)製作した透過型可変減衰器のSEM写真(b)拡大図

した。最初に裏面にシリコン深堀エッチング時のマスクとするためのシリコン酸化膜を熱酸化により成膜し、裏面よりシリコン基板を250 μm エッチングした。残された約30 μmのシリコン層はアルミのサブ波長格子の犠牲層として利用する。次に電子線(EB)レジストを基板表面に厚さ270 nmで塗布し、EB直接描画によりアルミのサブ波長格子のリフトオフ用パターンを描画する。この際、加速電圧は25 kV、注入電荷量は40 μC/cm²で描画した。その後、EB蒸着装置によりアルミを100 nm成膜し、リフトオフによりアルミのサブ波長格子パターンを形成した。最後に、XeF₂ガスによりアルミサブ波長格子下部のシリコン基板をエッチングし、格子をリリースした。XeF₂ガスを使用したのはプラズマによるチャージアップを防ぐ目的がある。

4. 研究成果

(1)シリコン NEMS アクチュエータの低電圧駆動

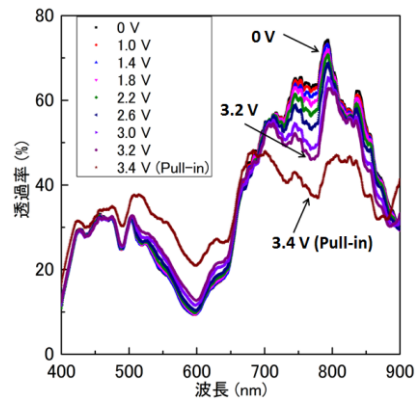


図6 駆動電圧に対する透過型可変減衰器の透過率変化

製作したサブ波長格子を用いた透過型可変フィルタのSEM画像を図5(a)に示した。フィルタ部は30 × 30 μm、サスペンション部の長さは10 μmで形成された。フィルタ部とサスペンション部の下部には基板貫通孔が形成され、直径は約45 μmである。図5(b)にはフィルタ部とサスペンション部の境界を拡大したSEM画像を示した。360 nmの格子ギャップを持つサブ波長格子がスティクションせずに中空構造を形成していることが分かる。また、フィルタ部とサスペンション部で異なる幅の格子形成に成功している。

透過光スペクトル測定では、透過型顕微鏡を用い、製作した透過型可変減衰器に白色光を裏面より垂直に入射した。可変減衰器からの透過光は対物レンズを通して0次光を光ファイバへと入れ、末端を分光器(Ocean Optics USB2000)へ入力することで透過光スペクトルを測定した。透過型可変フィルタの電極に電圧を印加し透過光スペクトルを制御した。図6に製作したサブ波長格子を用いた透過型可変フィルタの透過光スペクトル変化を示した。駆動電圧を0 Vから3.4 Vまで変化させたときの透過光スペクトルの変化を示しており、800 nm付近の透過ピークにおいて駆動電圧の増加により透過光が連続的に減衰していることが分かる。波長775 nmにおいて駆動電圧を0 Vから3.2 Vへ増加させると63.3%から46.5%まで透過光が減衰した。また、駆動電圧を3.4 Vまで増加させると平行平板静電アクチュエータ同士がpull-inし、その際、37.4%まで透過光が減衰した。図2で示した光学解析シミュレーション結果と比較し、透過光ピークの位置はほぼ一致していると考えられる。これはサブ波長格子の周期構造が設計値通りに形成されていることを示している。しかし、800 nm付近の透過光ピークの透過率が計算値に比べ小さい。これは、格子表面のエッチング時の段差等からの散乱が発生したことで透過率が減少したと考えられる。

(2) 表面プラズモン共鳴を用いた広変調帯域カラーフィルタ

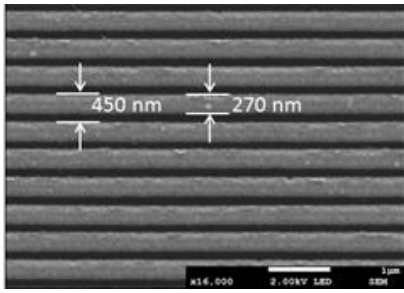


図 7 製作したアルミのサブ波長格子を持つ表面プラズモンカラーフィルタの SEM 画像

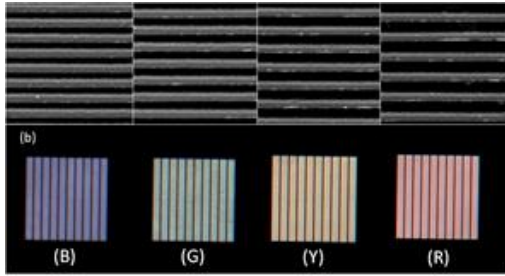


図 8 製作した表面プラズモンカラーフィルタの顕微鏡写真

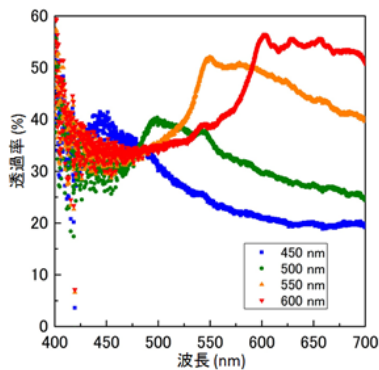


図 9 製作した表面プラズモンカラーフィルタに TM 波を入射した際の透過スペクトル

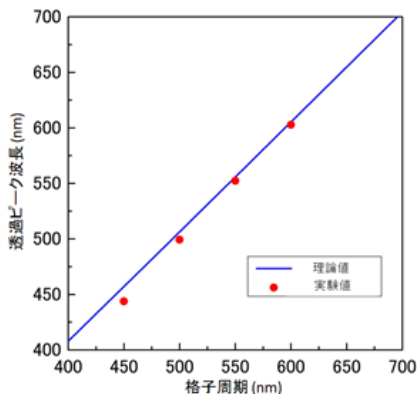


図 10 製作したカラーフィルタの透過ピーク波長と理論値の比較

図 7 に製作した表面プラズモンカラーフィルタの SEM 画像を示した。フィルタサイズは $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ で製作した。また、設計が格子幅 250 nm、格子周期 400 nm に対して実測された寸法が格子幅 450 nm、格子周期

270 nm であった。

図 8 に製作した表面プラズモンカラーフィルタの顕微鏡写真を示した基板下部より白色光を入射し、上面より透過光の色を観察している。格子周期が 450 nm で青色、500 nm で緑色、550 nm で黄色、600 nm で赤色を示していることが分かる。また、 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ のフィルタサイズ内で均一な色を発生させていることが分かる。

図 9 に製作した表面プラズモンカラーフィルタの透過スペクトルを示した。これより格子周期が大きくなるにつれ透過ピーク波長も大きくなっていることが分かる。透過ピーク波長の透過率は最大 56% であった。またサイドバンドとの透過率の差は約 20% であった。これらは基板に固定されたアルミの表面プラズモンカラーフィルタと同程度である。図 10 に式(1)より算出した格子周期に対する透過ピーク波長の理論値と図 6 の製作した表面プラズモンカラーフィルタより測定した透過ピーク波長の実測値を示した。理論値の算出のため、 m は 1、 ϵ_d は Air として 1 とした。 ϵ_m はアルミのプラズマ周波数を $2.4 \times 10^{16} \text{ Hz}$ とし算出した。グラフより理論値と実験値が一致していることが分かる。これより、透過スペクトルに現れている透過ピークは表面プラズモンの異常透過に起因したのものであると考えられる。FDTD シミュレーションの透過ピーク波長と実測の透過ピーク波長が約 5~10% 程の差があることに関して、これは格子の厚さや格子表面の凹凸、格子断面の設計値と実測値の違い等の製作時の誤差によるものであると考えられる。これらより、提案したアルミの表面プラズモンカラーフィルタは格子幅一定でも格子周期を MEMS/NEMS アクチュエータにより制御することで可視光全域の色を出すことが可能であることが分かった。

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 1 件)

H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "A low-voltage and high uniformity NEMS tunable color filter based on subwavelength grating," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 51, no. 11, pp. 11PA01-04 (2012)

[学会発表] (計 10 件)

[1] H. Honma, K. Takahashi, M. Fukuhara, M. Ishida, and K. Sawada, Investigation of filter size and duty ratio on transmission color filter based on surface plasmons," Int. Conf. on Optical MEMS & Nanophotonics 2014, 17-21 Aug., 2014, Glasgow, Scotland, to be poster presented.

[2] H. Kumagai, H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "Surface-plasmon-based flexible color filter using Al nanostructure array on

parylene-N thin film,” Int. Conf. on Optical MEMS & Nanophotonics 2014, 17-21 Aug., 2014, Glasgow, Scotland, to be oral presented.

[3] H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, “Transmission color filter based on surface plasmon using Al nanowire array,” 7th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies, June 29-July 2, 2014, Daegu, Korea, to be oral presented.

[4] 本間浩章, 高橋一造, 石田誠, 澤田和明, 「アルミナノワイヤを用いた透過型表面プラズモンカラーフィルタの製作」平成 26 年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会 マイクロマシン・センサシステム研究会, 平成 26 年 5 月 27 日～28 日, 東京大学生産技術研究所, pp. 93-97.

[5] 本間 浩章, 高橋一造, 石井 仁, 石田 誠, 澤田 和明, 「サブ波長格子を用いた 3.3 V 駆動透過型可変減衰器」第 5 回「集積化 MEMS シンポジウム」論文集, 平成 25 年 11 月 5 日～7 日, 仙台国際センター, pp.6PM2-E-4 -1～5.

[6] 本間浩章, 高橋一造, 石井仁, 石田誠, 澤田和明, 「サブ波長格子を用いた透過型可変減衰器の製作」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 平成 25 年 9 月 16 日～20 日, 同志社大学, p. 13-215.

[7] H. Honma, K. Takahashi, H. Ishii, M. Ishida, and K. Sawada, “A 3.3 V operated variable transmission attenuator based on subwavelength grating,” Int. Conf. on Optical MEMS & Nanophotonics 2013, 18-22 Aug., 2013, Kanazawa, pp 107-108.

[8] 平尾直也, 本間浩章, 高橋一造, 石田誠, 澤田和明, 「NEMS 静電アクチュエータを用いた近赤外可変フィルタの設計」平成 24 年度電気関連学会東海支部連合大会, 平成 2012 年 9 月 24 日～25 日, 豊橋技術科学大学, M2-9

[9] 本間浩章, 宮尾肇, 高橋一造, 石田誠, 澤田和明, 「静電マイクロアクチュエータを用いたサブ波長格子可変カラーフィルタ」電子情報通信学会ED研究会, 平成 24 年 5 月 17 日～18 日, 豊橋技術科学大学, pp. 111-115.

[10] H. Honma, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, “A low-voltage and high uniformity NEMS tunable color filter based on subwavelength grating,” Materials Research Society (MRS) 2012 Spring Meeting, San Francisco, CA, 9-13 April, B2.4.

〔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：高橋一造, 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：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 一造 (たかはし かずひろ)

豊橋技術科学大学・工学研究科・講師

研究者番号：90549346