

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21810013

研究課題名（和文）

MEMS 技術を用いた可変サブ波長格子カラーフィルタの開発

研究課題名（英文）

Development of MEMS Tunable Color Filter Based on Sub-wavelength Grating

研究代表者

高橋 一浩 (TAKAHASHI KAZUHIRO)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90549346

研究成果の概要（和文）：本研究ではサブ波長格子に機械的変位を加えることにより、反射・透過光の波長を変調する新規な可変カラーフィルタを提案している。格子を駆動するための MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) アクチュエータの構造設計および解析、サブ波長格子の光学設計、半導体微細加工技術を用いてデバイス作製を行った。提案する構造では、高速応答、低消費電力、および高いフィルファクタが期待できる。シリコンウェハ上にサブ波長格子に静電駆動方式の NEMS アクチュエータを一体化したデバイスを作製し、構造色の発生を確認した。初期状態では黄色を示していたフィルタが、電圧供給によって格子間のギャップが変化し、緑色の反射光が得られた。さらに、カラーフィルタを駆動する集積回路の機能融合も検討し、一体化したデバイスにおいて駆動回路の動作を実証した。

研究成果の概要（英文）：We propose a MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) tunable color filter using sub-wavelength grating, which can modulate the reflected light by changing the period of the sub-wavelength grating pixel by means of electrostatic actuation. We report the mechanical design of the MEMS actuator, optical design of the sub-wavelength grating, and device fabrication technique using a semiconductor technology. The MEMS electrostatic actuator could be designed a high mechanical resonance frequency with a relatively low drive voltage. The structural color was found from the fabricated sub-wavelength grating integrated with the MEMS actuator on a silicon wafer. The color tuning from yellow to green was demonstrated by voltage operation. We also developed a monolithic integration technique of the MEMS tunable color filter and LSI circuits. The fabricated driver circuits were successfully operated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010 年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノデバイス

キーワード：NEMS/MEMS, サブ波長格子, ナノフォトニクス, CMOS 集積回路, 静電アクチュエータ, 構造色

## 1. 研究開始当初の背景

**MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)**技術と微小光学との整合性は高く、微小な機械的変位から大きな光学効果を得ることができる。たとえば、マイクロミラーを傾けて光の減衰を行う可変型光減衰器や、ファブリ・ペロ干渉計のミラー間隔を波長と同程度の変位で制御することにより、可変型の波長フィルタを構成できる。特に微小ミラーや回折格子をレーザと組み合わせた投影型のディスプレイは、液晶をはじめとする従来方式に比べ高い色再現性を示し、高速動作が可能である。その応答速度の差は動画再生時に顕著に表れ、鮮鋭でなめらかに動く映像を表現できる。また、最近では回折格子を波長以下のスケールで作製されたデバイスでは、高い波長選択性や特殊屈折効果など新しい現象が報告され、新規なフォトニック素子への期待が高い。これらの周期構造は波長により決定されており、その特定波長に対する共振構造であるので、周期をわずかに変えることで、極めて大きな光出力応答変化が得られ、優れた波長選択性能を実現できる。

## 2. 研究の目的

本研究では半導体マイクロマシニング技術を用いて、サブ波長格子とそれを駆動するためのアクチュエータを作製し、格子構造に機械的変位を加えることにより、反射・透過光の波長を変調するデバイスを提案する。すなわち、色素由来ではなく構造によって決まる発色機構を利用した新規なディスプレイ素子の研究開発を行う。反射光のスペクトル変化の原理検証を目的に、サブ波長格子の光学・機械設計を行い、MEMS製造プロセスにより実際に素子を作製し、ピクセル動作の達成を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究で作製するサブ波長格子カラーフィルタは、設計手法が確立されておらず、波長ごとに電磁界解析から格子構造および可動構造とするための構造設計をする必要がある。各部分の設計指針および現在計画しているデバイス作製方法を以下で述べる。

### (1)サブ波長格子の光学解析

可視領域におけるサブ波長格子の先行研究例では、ガラス基板やシリコン薄膜上に作製した例のみで、中空構造をもつシリコン格子を設計・試作したという報告例はない。格子中の共振現象は、格子上下のレイヤの屈折率によって変化するので、空気中に格子が存在する場合の設計を新たに行う。なお、共振

現象は2層の屈折率差が重要になり、高屈折率体であるシリコン(屈折率  $n>4.0$ )に比べて、空気( $n=1$ )やガラス( $n=1.5$ )はどちらも低屈折率体であり、基板のガラスをなくすことは問題がないと推察される。

### (2)可動構造の構造解析

提案するMEMS可変カラーフィルタでは、サブ波長格子のフォトニックバンドによって特定波長の反射光が得られ、この格子構造を可変にすることによって反射スペクトルを変化させることができる。サブ波長格子の格子間のギャップを可変にするためのMEMSアクチュエータの駆動方式の検討を行い、有限要素法を用いた構造解析から各寸法を決定する。

### (3)作製技術の開発

MEMS構造体は応力に非常に敏感な構造体と考えられるため、薄膜を積層していく表面マイクロマシニング技術ではなく、単結晶のシリコン層を加工するバルクマイクロマシニング技術で製作する。微小機械構造の作製には、ICP (Inductively Coupled Plasma : 誘導結合プラズマ)ドライエッチング装置および電子線描画装置もしくはステッパ、両面コンタクトアライナを使用する予定である。

### (4)LSI回路との集積化プロセス整合性確認

波長可変カラーフィルタのディスプレイ応用を見据えて、駆動回路との一体化プロセスの検討を行う。集積化技術の確立により、配線幅やCMOS駆動回路の配線遅延の問題を解決することが期待できる。申請者はこれまでに、ディスプレイ向け素子として可動回折格子とLSI駆動回路を集積化し、そのピクセル動作に成功している。その実績を生かして、(3)で検討しているプロセスもLSIとの混載を念頭において行う。また、LSI回路の設計・製作には申請者の所属する豊橋技術科学大学で長年の実績がある。簡単なMOSトランジスタ基板を用意して、MEMSポストプロセスを行い、両者の動作を確認する。

## 4. 研究成果

### (1)光学設計

サブ波長格子の光学解析にはRCWA法(厳密波結合理論)を用いた。シリコンのサブ波長格子において可視光範囲で強い反射が得られ、かつ周期構造の変化により反射特性に変化が得られることを確認した。例えば周期600nm(格子幅220nm, ギャップ380nm)ではギャップ長が100nmほど変位すると、653nmの波長の反射率をおよそ

60 %低下させることができる (図1).

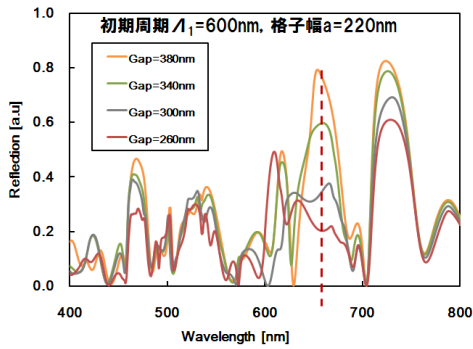


図1 サブ波長格子の光学解析結果

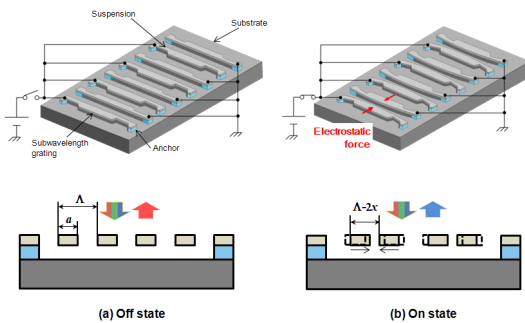


図2 MEMS 可変カラーフィルタの模式図

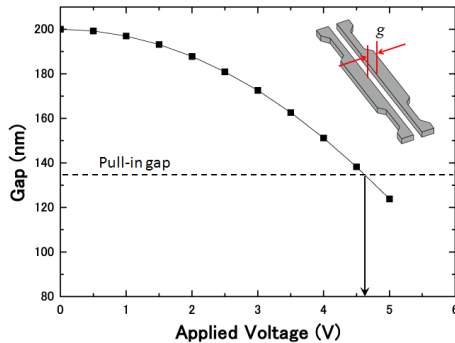


図3 MEMS アクチュエータの電圧-変位特性

(2)構造設計

サブ波長格子の周期を可変とるためにアクチュエータ機能を集積化したフィルタの模式図を図2に示す。シリコン製の両持ち梁が埋め込み酸化膜を介して基板に固定されている。ブリッジ中央の幅の太い部分は回折格子である。その両サイドの細くなった部分がサスペンションであり、駆動時に弾性変形をする。アレイ化した構造体には、グラウンド、動作電圧を交互に与えて、横方向に変位させる。このとき、構造体が一方方向にだけ移動するように、

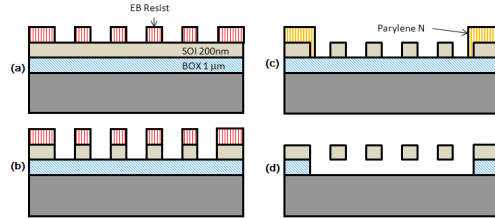


図4 製造プロセス

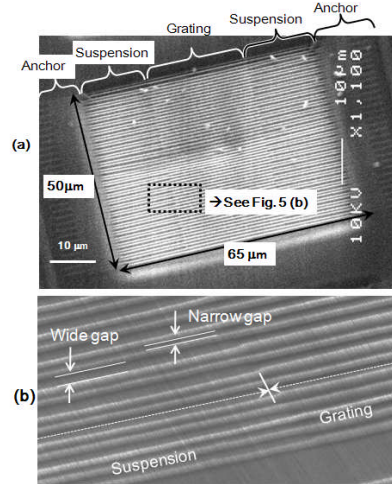


図5 MEMS 可変カラーフィルタのSEM像

サスペンションは中央ではなく、移動方向に静電引力が強く働くようにギャップを狭くしている。

光学解析をもとに、格子間ギャップ長の変化を実現するアクチュエータの駆動電圧をFEM(有限要素法)により求めた(図3)。アクチュエータの長さを60µmとすると5V程度の電圧で、色変化が実現できることがわかった。またアクチュエータの共振周波数は386kHzが得られた。これは応答速度にすると数µsとなり、液晶と比較し2桁程度上回りディスプレイ素子として十分な応答速度である。この結果より、小型・高速・低消費電力という特徴を実現できる見通しが立った。

(3)デバイス作製

デバイスの作製には、SOI (Silicon-on-Insulator)基板を用いた。SOI層の厚みは150nm、BOXの厚みは1µmである。(a)まずEBレジスト(ZEP520A-7 ZEON)を塗布し、電子線描画装置を使ってサブ波長格子の图案の描画を行った。(b)次にRIEによりSOI層をドライエッチングした。(c)今回提案している静電アクチュエータではアンカーが微小なため、犠牲層エッチング時にはアンカーエリアを保護する必要がある。粒子径が細かく被覆性のよいパリレンNという有機材料を蒸着によって堆積させた。(d)酸素

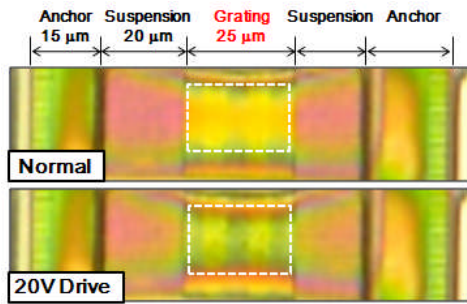


図 6 可変カラーフィルタの駆動結果

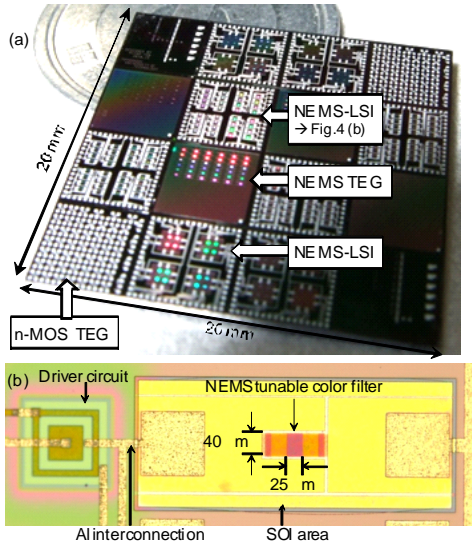


図 7 集積化カラーフィルタのチップ写真

プラズマによってフィルタエリアのみ開口し、BHF 中で BOX の犠牲層エッチングを行った。構造体が張り付くスティクション現象を防止するため、超臨界CO<sub>2</sub>乾燥装置中で、液体を乾燥させた。最後に酸素プラズマで保護膜を除去し、デバイスが完成する。作製した NEMS 可変フィルタの SEM 写真を図 5 に示す。フィルタエリアは 50 x 65 μm である。格子の幅は 500 nm、長さ 65 nm、ギャップ 400 nm とした。

図 6 に初期状態と電圧 20 V 印加時の色変化の様子を示す。初期状態が黄色を示していたものが、電圧供給によってギャップが変化し、緑色の反射光が得られている。以上より、NEMS アクチュエータを用いて構造色を可変とするデバイスの原理検証に成功した。さらに幅とギャップを 200 nm ずつと微細化したデバイスでは駆動電圧を 5 V 程度にまで低電圧化することができた。

#### (4)集積化プロセス

提案するサブ波長格子カラーフィルタは、LSI 集積回路との一体化が可能である。集積化技術の確立により、配線輻輳や CMOS 駆動回路の配線遅延の問題を解決することが期待できる。両者の製造技術の整合性を確認するために、前工程で n-MOS 回路を製作し、後工程で MEMS カラーフィルタを集

積化した。製作したチップの写真を図 7 に示す。集積化したチップにおいてもサブ波長格子の幅とギャップに応じた発色が得られた。また、ポストプロセス前後で nMOSFET の特性に変化がないことを確認し(図 8)、駆動用に設計したソースフォロワの動作に成功した(図 9)。これより、ナノメカニカル素子と集積回路の異種機能集積化に成功した。

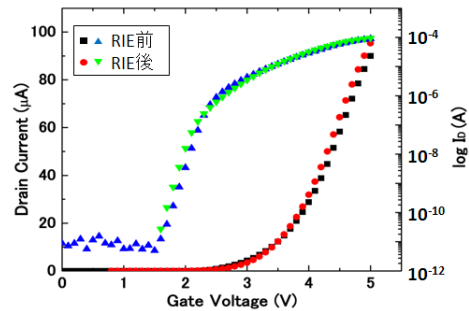


図 8 ポストプロセス前後の nMOS の特性

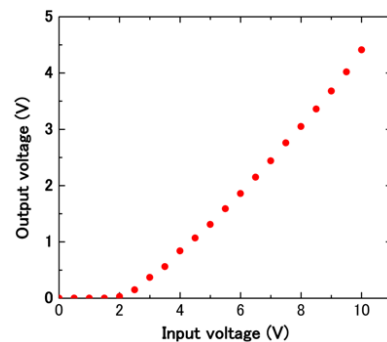


図 9 集積化したソースフォロワの出力特性

#### 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 1 件)

- ① M. Mita, S. Maruyama, Y. Yi, K. Takahashi, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "Multi-Physics Analysis for Micro Electromechanical Systems Based on Electrical Circuit Simulator," IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, vol. 6, no. 3, March 2011, pp.180-189.

[学会発表] (計 7 件)

- ① H. Honma, H. Miyao, K. Takahashi, M. Futagawa, F. Dasai, M. Ishida, and K. Sawada, "Monolithic Integration of NEMS Tunable Color Filter and LSI Driver Circuits," Proc. 16th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS '11), 5-9 June, 2011,

- Beijing, China, to be oral presented.
- ② H. Miyao, K. Takahashi, M. Ishida, and K. Sawada, "A Tunable Color Filter Using Sub-micron Grating Integrated with Electrostatic Actuator Mechanism," 219 th ECS Meeting, 1-6 May, 2011, Montreal, Canada, to be oral presented.
- ③ H. Yamada, Y. Onozuka, A. Iida, K. Itaya, H. Funaki, K. Takahashi, and H. Toshiyoshi, "A wafer-level system integration technology for flexible pseudo-SOC incorporates MEMS-CMOS heterogeneous devices," Proc. IEEE Components, Packaging, and Manufacturing Technology Symposium Japan, Aug. 24-26, Tokyo, Japan, 1-3.
- ④ A. Higo, K. Takahashi, M. Nakada, H. Fujita, H. Toshiyoshi, and Y. Nakano, "Parylene Covered Selective Area HF Vapor Release For Silicon Photonic Wire Waveguides," Proc. 5th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology, July 6-9, 2010, Perth, Australia, p.168.
- ⑤ K. Takahashi, I. W. Jung, A. Higo, Y. Mita, H. Fujita, H. Toshiyoshi, and O. Solgaard, "A CMOS Compatible Low Temperature Process for Photonic Crystal MEMS Scanner," Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics 2009, Aug. 17-20, 2009, Clearwater Beach, Florida, USA, pp. 77-78.
- ⑥ A. Higo, K. Takahashi, H. Fujita, Y. Nakano, and H. Toshiyoshi, "A Novel Parylene/Al/Parylene Sandwich Protection Mask for HF Vapor Release for Micro Electro Mechanical Systems," Proc. 15th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS '09), June 21-25, 2009, Denver, Colorado, USA, pp. 196-199.
- ⑦ S. Maruyama, K. Takahashi, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "A MEMS Digital Mirror Array Integrated with High-Voltage Level-Shifter," Proc. 15th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS '09), June 21-25, 2009, Denver, Colorado, USA, pp. 2314-2317.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：サブ波長格子及び表示装置  
 発明者：高橋一浩，宮尾肇，澤田和明  
 権利者：豊橋技術科学大学  
 種類：特許  
 番号：特願 2009-253409  
 出願年月日：2009 年 11 月 4 日  
 国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

[その他]  
 ホームページ等  
<http://www.int.ee.tut.ac.jp/icg/>

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・助教  
 研究者番号：90549346

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：