

生物微細構造を模したナノ機械・微細構造による光制御

金森 義明

Biomimetic Nanomechanical Structures for Optical Control

Yoshiaki KANAMORI

Microstructures on the surfaces of animate beings have superb functions for optical control. Reproductions of the microstructures have a tremendous amount of potential to develop high-efficiency nanomechanical structures. In this review, attention is focused on applications of the reproduced microstructures to optical devices in optical information system. In contrast with several microstructures on the surfaces of animate beings, their applications to high-efficiency light-emitting diodes, structural color filters and variable structural-color microelectromechanical filters are described.

Key words: biomimetics, nanomechanical structures, moth-eye, structural color, MEMS

生物は進化と淘汰により、高効率で環境への負荷が低く、信頼性の高いシステムを構築してきた。このようなシステムの実現を目指し、生物のもつ構造や機能を模倣し工学的に応用する技術を、バイオミメティクスという。近年、急速な進歩を示しさまざまな応用が期待されているナノフォトニクスの分野において、高効率で環境に調和したデバイスの実現のために、バイオミメティクスを適応するのが無理のない革新的技術といえるのではないか。例えば生物の光制御システムにしても、ナノフォトニック構造が当然のように使われている。

中南米に生息するモルフォチョウの羽は「動く宝石」あるいは「モルフォブルー」と称され、美しい青色で輝いて見える。輝くような青は、メスに対するアピールである、あるいは羽ばたくときに点滅するように見えるので鳥に捕食されにくくするためという説があり¹⁾、羽は種の保存あるいは生存のための信号発信機能を兼ねているといえる。夜間行動型昆虫である蛾は、目の表面に反射防止構造が形成されており、微弱な光しかない薄暗い環境下でも光を十分に取り込むことができる。また、ネオンテトラの縦縞の色は、明るい場所では青緑色であるが暗い場所では濃紫色

へ変化し、興奮状態やストレス環境下では黄やオレンジ色の警戒色に変化することが知られており²⁾、環境状態を仲間知らせるためのアクティブな光通信素子として機能しているように思う。これらの生物がもつ発色性や反射率低減の光制御システムは、生物表面に形成されているマイクロ・ナノ構造が光を回折、干渉、散乱、屈折、共鳴作用させることによって発現する「構造色」によるものである。構造色をデザインや装飾用途に応用すれば、色素色とは異なる鮮やかで独特な色彩を表現することができる^{3,4)}。筆者は、構造色がもつ本来の目的と考えられる、信号発信、反射防止、アクティブな光通信といった今日の光情報化社会に欠かせない機能の応用に強い興味を抱く。

筆者の研究グループでは、micro electro mechanical systems (MEMS) デバイスの製作を得意としており、生物の表面微細構造の機能を応用した高効率なナノ光機械・微細構造の開発と光情報デバイスへの応用を目指している。本稿では、生物のもつ表面微細構造の一部を解説し、それを利用した発光ダイオード (light emitting diode; LED) の光取り出し効率向上、構造色利用カラーフィルター、発色可変 MEMS フィルターへの応用について述べる。

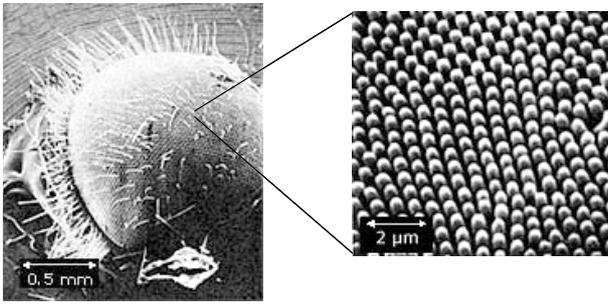


図1 蛾の目の表面(左)とモosaic構造(右)⁵⁾.

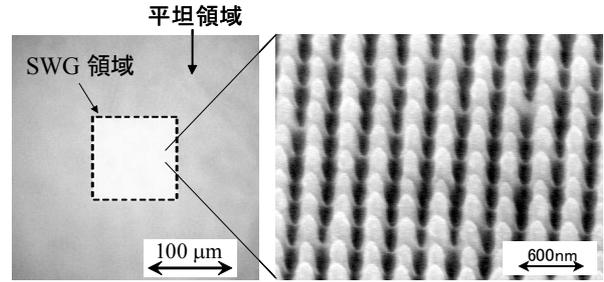


図3 LED発光の様子(左)と中央部に形成されたSWG構造(右)¹¹⁾.

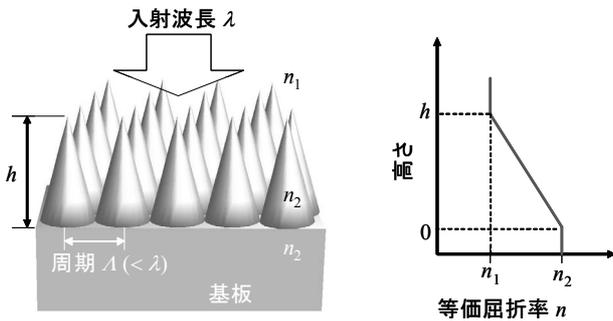


図2 SWG構造の模式図(左)と等価屈折率分布(右).

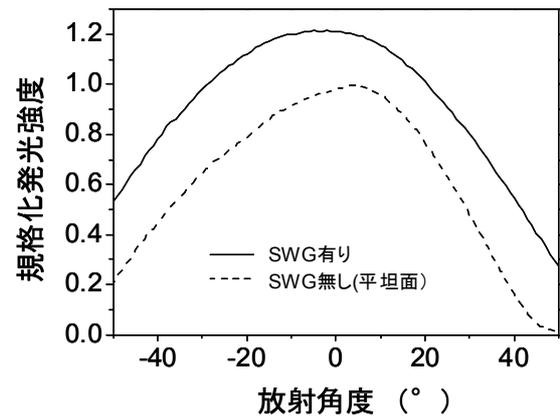


図4 SWGが形成されたLEDの放射角度と発光強度の関係¹¹⁾.

1. モosaic構造とLEDの光取り出し効率向上

1.1 モosaic構造

図1は蛾の目(モosaic)の表面構造である⁵⁾。蛾の目は複眼であるが、複眼のそれぞれの表面はサブミクロン周期の微細な凹凸構造で覆われており、媒質の屈折率境界で生じるフレネル反射を低減する。モosaic構造のように、入射する光波長よりも短い周期構造を、サブ波長格子(subwavelength grating; SWG)とよぶ。

図2に、円錐状の突起が二次元周期配列されたSWGの模式図と、媒質境界近傍の等価屈折率分布を示す。波長 λ の光が屈折率 n_1 の媒質から屈折率 n_2 の基板へ入射する。SWGの格子周期 Λ は入射波長 λ よりも十分小さい($\Lambda < \lambda$)。このとき、フレネル反射は屈折率の急激な変化により大きく生じるので、テーパ断面をもつSWGを材質表面に形成することにより、境界付近の等価屈折率 n が深さ方向に対して n_1 から n_2 まで緩やかに変化することになり、反射光が生じにくい。また、SWG周期が入射波長よりも小さいので、高次の回折波は発生せず、したがって波面の乱れが生じない(波面センサーやイメージデバイスへも応用できる)。特にSWGの反射防止は、適応できる波長帯域が広いこと、入射角度依存性が少ないこと等の特性があり、多層膜反射防止では得ることができない優れた特性が得られるため、多くの研究報告例がある⁶⁻¹²⁾。一部のカ

メラ用レンズでは、反射防止としてSWGが使われている⁶⁾。また、ナノインプリントリソグラフィ技術を用いれば、低コスト生産が可能である^{7,8)}。

1.2 LEDへの応用

近年、照明用途の高輝度・高効率LEDの開発が注目されている。LEDに用いられる半導体材料は屈折率が高いため、素子外部への光取り出し効率が低い(外部樹脂がない場合は20%以下)。素子表面にSWGを形成すると、発光スペクトル幅および視野角全域にわたりフレネル反射を低減できるので、光取り出し効率を改善できる¹¹⁾。

図3は、発光しているLEDの表面写真と中央部に形成されたSWG構造の写真である¹¹⁾。LEDは基板全体で発光しているが、中央部のSWG構造が形成されている領域では周辺のSWGがない領域よりも光強度が増加していることがわかる。試作されたSWGは、周期200 nm、高さ275 nmでアスペクト比1.38の釣鐘型断面形状である。図4に放射角度と発光強度の関係を示す¹¹⁾。SWGが形成された領域では、形成されていない領域より垂直放射成分が21.6%、角度積分放射強度が60%増加した。格子形状を最適化すれば、さらに光取り出し効率を向上できる。SWG形状の最適化はE. B. Grannらが報告している¹²⁾。

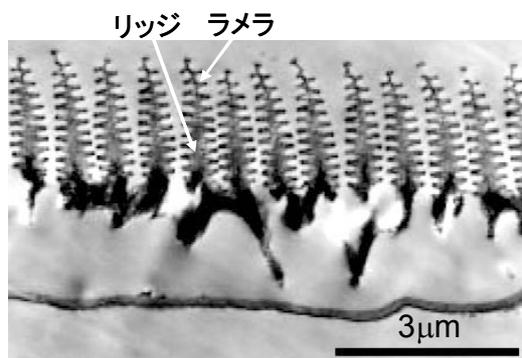


図5 モルフォチョウの鱗粉表面部の断面写真¹³⁾.

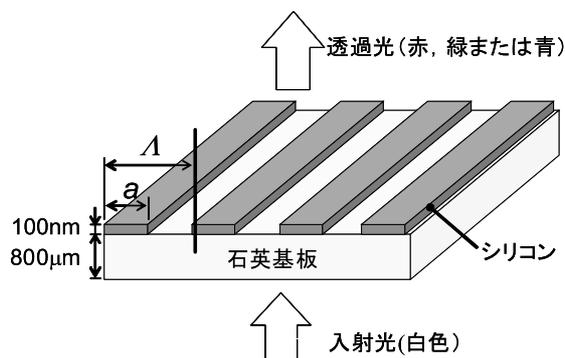


図6 透過型構造色利用カラーフィルター構造の模式図¹⁷⁾.

2. モルフォブルーと構造色利用カラーフィルター

2.1 モルフォブルー

モルフォチョウの鱗粉の断面は図5のように樹の枝のような構造をしており¹³⁾、モルフォブルーの発色機構は木下らのグループにより詳細に解明されている¹⁴⁾。リッジとよばれる垂直方向に伸びた幹部が周期的に配置され、その幹部からラメラとよばれる水平方向に伸びる薄板状の構造が多層配置されている。構造色の発現は、このような周期構造や多層構造による回折と干渉によるものが支配的である。リッジ高さのばらつきは光を拡散させ、回折スポットを出さずに視野角度特性を広げている。また、ラメラを形成するクチクラの隙間は空気であるため、多層構造を形成する材質（クチクラと空気）の大きな屈折率差により、少ない層数で高い反射率と広いスペクトル幅を得ている。薄くて軽量、かつ鮮やかな発色をするためにたどり着いた構造なのかもしれない。

実際に図5のような三次元構造を安価に大量生産するのは難しい。筆者らは、特定の波長を高い反射率（理論値では100%）で反射する平面状の波長選択フィルターである導波モード共鳴格子（guided-mode resonant grating; GMRG）フィルターを、構造色利用カラーフィルターに利用しようと考えた。GMRGフィルターは、基板上的屈折率が外部より高い導波層と、屈折率が周期的に異なる格子層で構成されている。格子周期と入射波長がほぼ同程度の場合、ある波長において格子部で発生するエバネセント波と外部に出て行く放射モードの光波が強く結合する導波モード共鳴が生じる。その結果、共鳴波長だけが反射され、その他の光は透過する。共鳴波長や帯域幅などの光学特性は、格子形状や屈折率、周囲媒質などによって決定され、さまざまなフィルターが設計されている¹⁵⁻²⁰⁾。工夫すると透過型フィルターも設計できる^{16,17)}。平面的なパターン形状で構造色を設計できるため、ナノインプリントリソグラフィーにより三原色のカラーフィルターを安価に一括

製作することができる。安価で設計自由度が高い構造色利用カラーフィルターは、ディスプレイ用カラーフィルターへの応用に期待が高まる¹⁷⁻²⁰⁾。以下に、筆者らのグループが試作した透過型と反射型の構造色利用カラーフィルターについて紹介する^{17,18)}。

2.2 透過型構造色利用カラーフィルター

図6に、透過型構造色利用カラーフィルター構造の模式図を示す¹⁷⁾。Silicon on insulator (SOI) 基板として、石英基板（透明な石英ガラス）上のシリコン（100 nm厚）を用いている。赤、緑、青フィルターにおいて、格子の周期 A はそれぞれ 400 nm, 350 nm, 440 nm であり、幅 a はそれぞれ 279 nm, 231 nm, 177 nm である。溝および周囲は空気である。格子層の等価屈折率は周囲の屈折率よりも大きいため、格子層は導波層の役割も兼ね、導波モード共鳴が生じる。入射光は、石英基板側から垂直入射し、格子寸法に応じて赤、緑、青のいずれか一色が透過する（実際には導波モード共鳴の効果だけでなく、吸収や膜厚方向の干渉などの効果も含まれる）。3色のカラーフィルターは同じ厚みであり、各色のフィルター構造は格子周期 A と幅 a の違いだけなので、同一基板上に一括製作される。

図7に、試作された透過型構造色利用カラーフィルターの透過スペクトル特性を示す¹⁷⁾。実験値は実線で、rigorous coupled-wave analysis (RCWA) 法²¹⁾による計算値は点線で示されている。また、人間の目の分光感度特性を表す等色関数も示す。測定した赤、緑、青フィルターの最大透過率はそれぞれ 71.1%, 58.1%, 59.3% であり、そのときの波長はそれぞれ 597.6 nm, 545.4 nm, 440.9 nm である。計算値によると、赤、緑、青フィルターの最大透過率はそれぞれ 73.4%, 63.7%, 59.0% であり、そのときの波長はそれぞれ 597 nm, 544 nm, 440 nm であることから、実験値と計算値は特に最大透過率の付近でよく一致しているといえる。また、等色関数と傾向が類似していることか

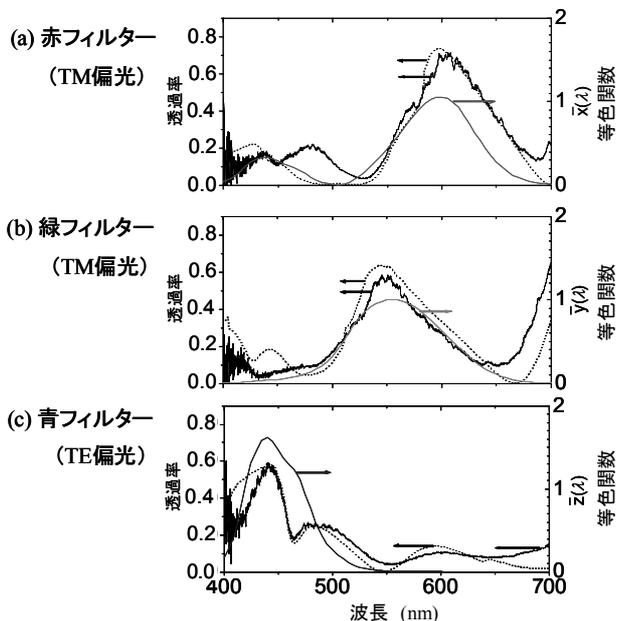


図7 透過型構造色利用カラーフィルターの透過スペクトル特性¹⁷⁾. 実線は実験値, 点線は計算値を示す. 右軸は等色関数を示す.

ら, 試作されたフィルターは人間の目の分光感度に近い特性をもつことがわかる.

2.3 反射型構造色利用カラーフィルター

図8に, 反射型構造色利用カラーフィルターの模式図を示す¹⁸⁾. 高屈折率 (n_{high}) のポリマーから成る格子層および導波層が, 低屈折率 (n_{low}) のポリマーから成る基板上に形成されている. 安価に生産するために, 基板も含めてすべてポリマーで形成されており, ナノインプリントリソグラフィーにより製作されている. 光は格子層側から垂直入射する. 溝および周囲は空気 ($n=1.0$) である. 導波モード共鳴の条件を満たした波長は, 理論上 100% 反射する. 格子周期などの形状パラメーター次第で, 赤, 緑, 青のなかの一色が反射される. リソグラフィーで自在にパターンニングできるので, 任意の可視波長に対するカラーフィルターを製作することができる.

図9に, 試作された反射型構造色利用カラーフィルターの反射スペクトル特性例を示す¹⁸⁾. TE 偏光を用いている. 反射ピーク波長は格子周期 Λ に対して線形であり, バンド幅は約 15~18 nm, 最大反射率は 50% 以上が得られている. 基板の平坦性とナノインプリントの転写精度を改善することで, 最大反射率を理論値の 100% に近づけられると考えている.

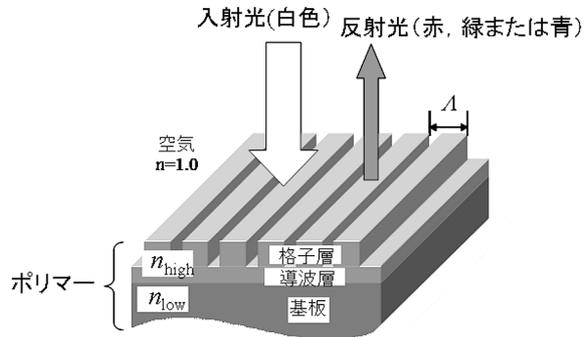


図8 反射型構造色利用カラーフィルター構造の模式図¹⁸⁾.

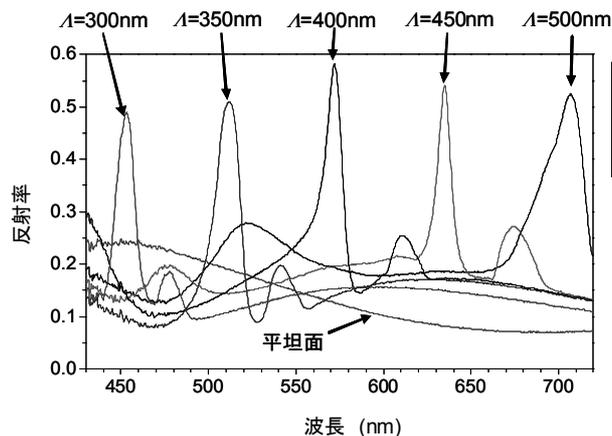


図9 反射型構造色利用カラーフィルターの反射スペクトル特性 (TE 偏光)¹⁸⁾.

3. ネオンテトラ型虹色素胞と発色可変 MEMS 光フィルター

3.1 ネオンテトラの体色変化

図10に, ネオンテトラの体側縦縞部の表皮の下にある虹色素胞の断面模式図を示す. 虹色素胞には光反射小板が多層構造になっており, 干渉により特定の色が輝いて見える. 光刺激やストレスが加わると細胞内で光反射小板が運動し, 光反射小板間の距離 d が変化することにより, 干渉で強め合う光の波長が変化する²⁾. 要するに, 多層膜の周期間隔を機械的に制御して色を変えている. 色素で発色する場合は色を変えることはできないが, 構造色の場合は構造を変形させれば反射光や透過光の色を変化させることができる. 周期や間隔が可変の MEMS デバイスを実現できれば色のチューニングが可能であり, 波長多重光通信システムのフィルターへの応用が期待できる. 以下に, GMRG フィルターやフォトニック結晶の構造色フィルターをシリコンマイクロアクチュエーターと組み合わせた波長選択 MEMS フィルターおよび反射強度可変 MEMS フィルターの試作例を紹介する^{22, 23)}.

3.2 波長選択 MEMS フィルター

GMRG フィルターを用いた構造色利用カラーフィル

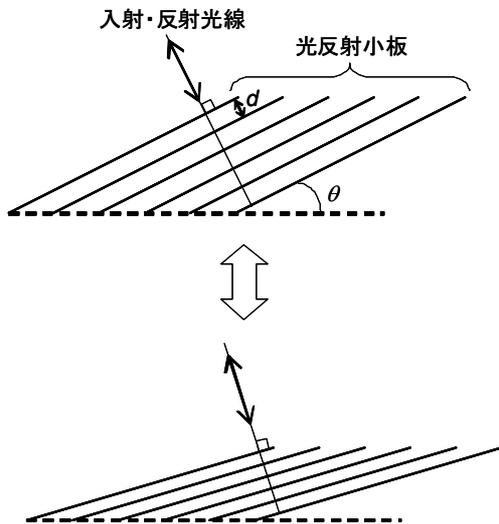


図10 ネオンテトラの虹色素胞の断面模式図。

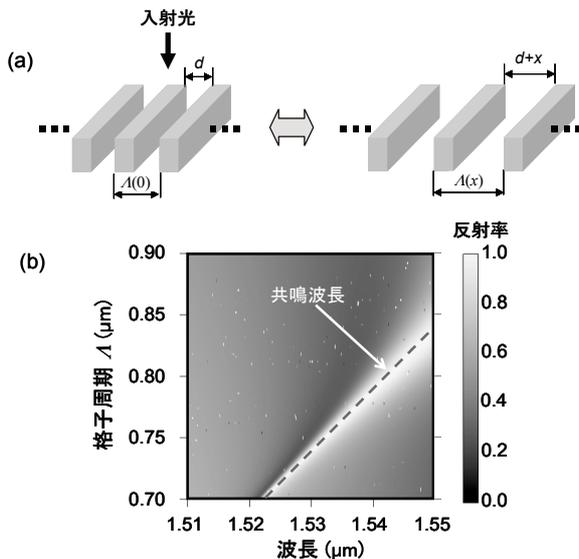


図11 波長選択 MEMS フィルターの動作模式図 (a) と RCWA 法による光学設計 (b)²²⁾。

ターは、図 11 (a) のように格子周期を変えることで反射波長を変化させることができる。RCWA 法による光学設計により、光通信帯域で反射波長をチューニングできるように格子形状が決まっている (図 11 (b))²²⁾。図 12 は試作されたデバイスの写真である²²⁾。格子の初期周期は 860 nm である。格子は細いシリコンの梁が並んだ構造で、それぞれの梁の両端がシリコンの接続ばねで結合されている。すなわち、すだれのような構造で、両端を静電アクチュエーターに固定して張力を加えて格子周期を広げる。静電アクチュエーターは、櫛歯型で、向かい合わせた櫛歯構造に電圧を印加して、引力を発生させる。80 V の駆動電圧により、波長 1523~1531 nm で滑らかな波長選択特性が得られる。

3.3 反射強度可変 MEMS フィルター

クジャクの羽根が鮮やかな構造色を発現するのは、羽根の内部にフォトニック結晶に類似した微細構造が存在し、その構造が特定の光を強く反射することによる。フォトニック結晶は、ある波長が入射するとその内部および近傍に強いエバネセント波が発生し、光を閉じ込める。ある条件では GMRG フィルターと同様、閉じ込められた光は放射モードと強く結合し、理論上 100% の反射光となる。フォトニック結晶が周囲物質に波長程度の距離まで近づくと、エバネセント波は伝搬光として周囲物質へ漏れ出す。そこで、図 13 のように、可動フォトニック結晶スラブと基板間のギャップを MEMS アクチュエーターを用いて制御することで、エバネセント波の漏れ出し量を調整することができ、わずか数百 nm のギャップ変化で特定波長の反射率を 100% から数% まで可変できる。このとき、ピーク波長のシフトはほぼないので、光通信システムにおいて隣

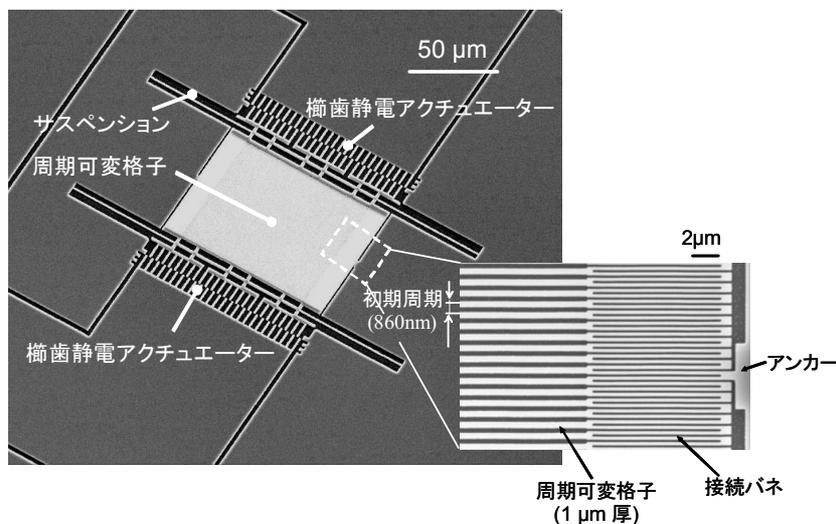


図12 試作された波長選択 MEMS フィルター²²⁾。

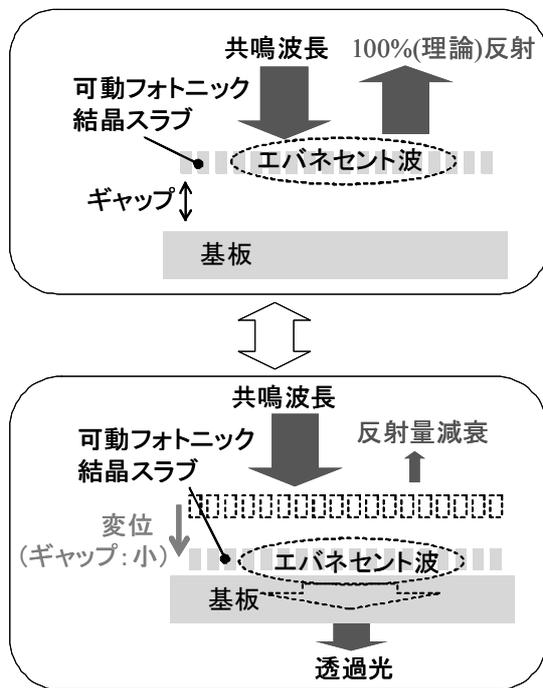


図13 反射強度可変 MEMS フィルターの動作模式図.

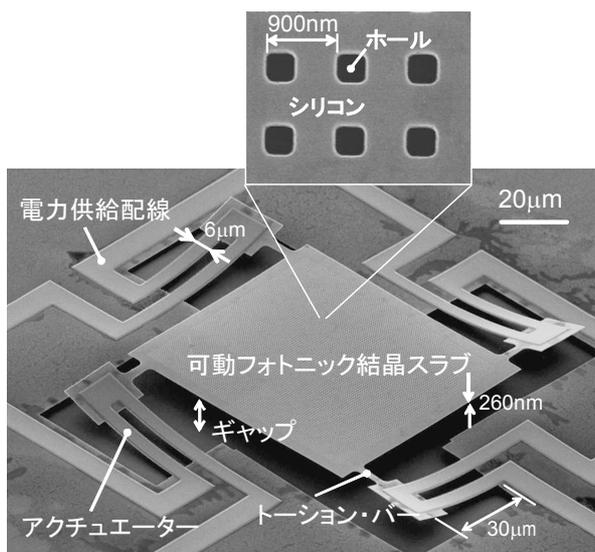


図14 試作された反射強度可変 MEMS フィルター²³⁾.

の波長チャンネルに影響を及ぼす問題がない。図14は、試作された反射強度可変MEMSフィルターの写真である²³⁾。可動フォトニック結晶スラブ(周期900nm, 厚さ260nm)は周囲に配置された4つのMEMSアクチュエーターに支えられ、基板との平行を保ちながら上下移動する。波長1545nmにおいて、ギャップが約400nmより狭くなると反射率が低下し、RCWA法による計算値と近い傾向が得られている。

生物のもつ表面微細構造と、そのメカニズムを模倣したナノ光機械・微細構造の開発事例を対比した。モスアイ構造は、わずか数百nm厚の凹凸構造でLEDの輝度を大きく向上することができる。構造色は、その鮮やかで独特な色合いから、繊維などの装飾素材や建築・インテリア素材に応用する研究・製品開発事例が多いが、本稿ではディスプレイ用カラーフィルターへの応用研究を紹介した。発色可変機構は光通信システムの分野で利用価値が高い。わずか数百nmの構造変化で広範な光制御が可能であることが大きな魅力である。生物の表面微細構造を模倣したナノ光機械・微細構造が、将来ますます役立つことを期待している。

本内容の一部は、東北大学大学院工学研究科羽根一博教授および木谷隆士氏、松山直樹氏、下野真也氏、勝部広樹氏と行った共同研究の結果の一部をまとめたものであり、深甚な謝意を表します。

文 献

- 1) 木下修一：“モルフォチョウの発色構造”，ファイバー：スーパーバイオメテックス—近未来の新技术創成一，本宮達也監修(エヌ・ティー・エス，2006) pp. 348-352.
- 2) N. Oshima: “Light reflection in motile iridophores of fish,” *Structural Colors in Biological Systems: Principles and Applications*, eds. S. Kinoshita and S. Yoshioka (Osaka University Press, 2005) pp. 211-229.
- 3) 能勢健吉：“構造発色繊維”，ファイバー：スーパーバイオメテックス—近未来の新技术創成一，本宮達也監修(エヌ・ティー・エス，2006) pp. 358-360.
- 4) 野坂俊紀：“薄膜光干渉発色布(タマムシの翅構造)”，ファイバー：スーパーバイオメテックス—近未来の新技术創成一，本宮達也監修(エヌ・ティー・エス，2006) pp. 371-376.
- 5) C. G. Bernhard: “Structural and functional adaptation in a visual system,” *Endeavour*, **26** (1967) 79-84.
- 6) 奥野丈晴：“サブ波長構造による高性能反射防止膜“SWC”の開発”，第34回光学シンポジウム予稿集(2009) pp. 1-4.
- 7) Y. Kanamori, E. Roy and Y. Chen: “Antireflection sub-wavelength gratings fabricated by spin-coating replication,” *Microelectron. Eng.*, **78-79** (2005) 287-293.
- 8) C.-J. Ting, F.-Y. Chang, C.-F. Chen and C. P. Chou: “Fabrication of an antireflective polymer optical film with subwavelength structures using a roll-to-roll micro-replication process,” *J. Micromech. Microeng.*, **18** (2008) 075001.
- 9) Y. Kanamori, K. Hane, H. Sai and H. Yugami: “100 nm period silicon antireflection structures fabricated using a porous alumina membrane mask,” *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 142-143.
- 10) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya and H. Kikuta: “Fabrication of microcone array for antireflection structured surface using metal dotted pattern,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L747-L749.
- 11) Y. Kanamori, M. Ishimori and K. Hane: “High efficient light-emitting diodes with antireflection subwavelength gratings,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14** (2002) 1064-1066.
- 12) E. B. Grann, M. G. Moharam and D. A. Pommet: “Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 333-339.
- 13) P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence and R. J. Wootton:

- “Quantified interference and diffraction in single *Morpho* butterfly scales,” Proc. Roy. Soc. London B, **266** (1999) 1403–1411.
- 14) S. Kinoshita, S. Yoshioka and K. Kawagoe: “Mechanisms of structural colour in the *Morpho* butterfly: Cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale,” Proc. Roy. Soc. London B, **269** (2002) 1417–1421.
 - 15) Z. S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin, P. P. Young and R. Magnusson: “High-efficiency guided-mode resonance filter,” Opt. Lett., **23** (1998) 1556–1558.
 - 16) S. Tibuleac and R. Magnusson: “Reflection and transmission guided-mode resonance filters,” J. Opt. Soc. Am. A, **14** (1997) 1617–1626.
 - 17) Y. Kanamori, M. Shimono and K. Hane: “Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrates,” IEEE Photon. Technol. Lett., **18** (2006) 2126–2128.
 - 18) Y. Kanamori, H. Katsube, T. Furuta, S. Hasegawa and K. Hane: “Design and fabrication of structural color filters with polymer-based guided-mode resonant gratings by nanoimprint lithography,” Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 06FH04.
 - 19) Y.-T. Yoon, H.-S. Lee, S.-S. Lee, S. H. Kim, J.-D. Park and K.-D. Lee: “Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon,” Opt. Express, **16** (2008) 2374–2380.
 - 20) E.-H. Cho, H.-S. Kim, B.-H. Cheong, P. Oleg, W. Xianyua, J.-S. Sohn, D.-J. Ma, H.-Y. Choi, N.-C. Park and Y.-P. Park: “Two-dimensional photonic crystal color filter development,” **17** (2009) 8621–8629.
 - 21) M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet and T. K. Gaylord: “Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings,” J. Opt. Soc. Am. A, **12** (1995) 1068–1076.
 - 22) Y. Kanamori, N. Matsuyama and K. Hane: “Resonant-wave-length tuning of a pitch-variable 1-D photonic crystal filter at telecom frequencies,” IEEE Photon. Technol. Lett., **20** (2008) 1136–1138.
 - 23) Y. Kanamori, T. Kitani and K. Hane: “Control of guided resonance in a photonic crystal slab using microelectromechanical actuators,” Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 031911.

(2010年3月8日受理)