

◆ 특집 ◆ 개인안전 3 차원 융합제품 제조기술

광학 센서 응용을 위한 모르포 나비 날개 모방 구조 설계

Design of Bio-Inspired Morpho Butterfly Structures for Optical Sensor Applications

김현명¹, 이길주¹, 김민석¹, 김규정^{2,✉}, 송영민^{1,✉}
Hyeon Myeong Kim¹, Gil Ju Lee¹, Min Seok Kim¹, Kyu Jung Kim^{2,✉}, and Young Min Song^{1,✉}

¹ 부산대학교 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, Pusan University)

² 부산대학교 광메카트로닉스공학과 (Department of Optics and Mechatronics Engineering, Pusan University)

✉ Corresponding author: k.kim@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2971

ysong@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-1526

Manuscript received: 2016.4.4. / Accepted: 2016.4.15.

Various species of insects display vivid colors, widely known as 'structural color' due to their optical interference. Morpho butterflies are famous for their brilliant iridescent colors, which arise from the photonic-nanostructures of optical interference on their wings. In this paper, we outline the results of a comparative study of the optical properties of bio-inspired Morpho butterfly structures with the widely known Distributed Bragg Reflector (DBR), conducted using a rigorous coupled-wave analysis (RCWA) method for the two structures. Almost analogous tendencies were observed for both Morpho and DBR structures. With variation in the surrounding media, however, Morpho structures showed an obvious peak shift while no significant changes were observed in DBR, which can be applicable.

KEYWORDS: Morpho butterfly (모르포 나비), Photonic crystal structure (광 결정 구조), Optical sensor (광학 센서), Biomimetics (생체모방기술)

기호설명

λ = Wavelength

n = Refractive index

1. 서론

모르포 나비는 날개의 나노 광학 구조에 의해 서 밝은 푸른빛을 내는 것으로 유명하다. 이러한 모르포 나비의 푸른 빛은 날개에 있는 라멜라

(Lamella)의 다층간섭 때문에 발생한다는 연구 결과가 보고된 바 있다.¹ 모르포 나비 날개의 구조색은 주변 환경과 접촉 면적이 넓은 구조의 특징 덕분에 반사되는 스펙트럼이 주변 환경 변화에 민감하게 변화하는 특징이 있다. 반사 스펙트럼이 주변 환경에 민감한 특성을 이용해 가스 센서로의 응용 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁻⁷

이러한 모르포 나비 날개를 모방한 구조를 만들기 위해 최근 몇 년간의 연구에서 Focused Ion Beam Methods,⁷ E-Beam Lithography,^{4,8} Laser

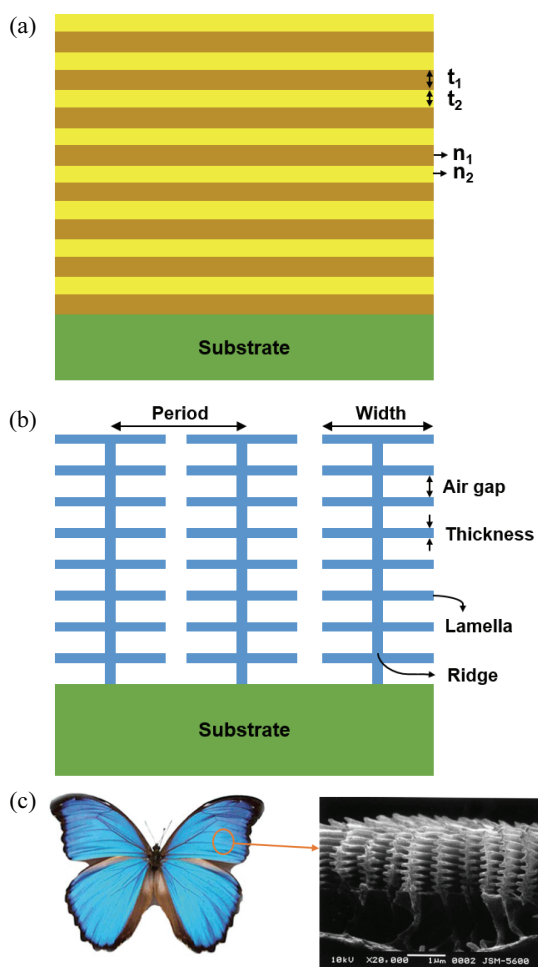


Fig. 1 Schematic illustration: (a) DBR structures, (b) Morpho structures used in the calculation, (c) Image of a Morpho butterfly and cross-sectional SEM image of wings scales¹² (Adapted from Ref. 12 with permission)

Interference Lithography,⁹ Multilayer Deposition of Two Different Material,^{2,10,11} 등 다양한 나노 공정 기술을 사용해왔다. 하지만 모르포 나비 날개 모방 구조 공정은 어렵고 복잡하므로 한번 만들 때 최적화된 구조로의 제작이 필요하며 구조에 따른 특성 분석이 선행되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 RCWA (Rigorous Coupled Wave Analyses) 계산 방법을 사용하여 빛의 간섭 원리를 이용하는 DBR (Distributed Bragg Reflector) 구조와 모르포 나비 날개 구조의 광학 시뮬레이션을 시행하였다. Fig. 1은 이 시뮬레이션에서 사용된 모델을 나타낸다.

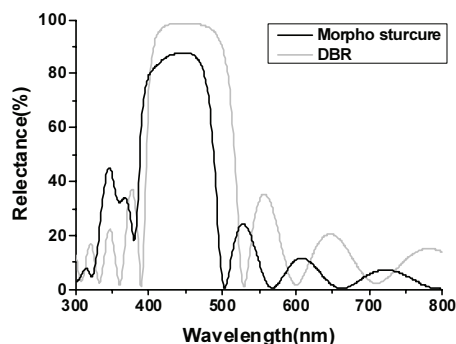


Fig. 2 Reflectance curves for two different structures (Morpho structure and DBR)

Fig. 1(a)의 DBR은 n_1 이 SiO_2 , n_2 는 Si_3N_4 로 각각 $t_1 = 76 \text{ nm}$ 와 $t_2 = 55 \text{ nm}$ 의 두께로 번갈아 가며 적층하여 최대 반사 파장이 모르포 나비 날개와 비슷하게 나오도록 모델링을 하였다. Fig. 1(b)의 모르포 나비 날개 구조 모델은 Fig. 1(c)의 실제 모르포 나비 날개를 관찰하여 얻은 크기로 Period는 770 nm , Width는 318 nm 로, Air Gap과 Thickness는 각각 180 nm , 64 nm 로 모델링 하였다. 이 시뮬레이션 결과로부터, 두 가지 구조의 유사점 및 차이점을 분석하고 이러한 특징을 이용하여 모르포 나비 날개를 모방한 가스 센서를 제안하고 최적화된 구조를 제시한다.

2. DBR 과 모르포 나비 날개 비교

일반적으로 높은 반사율을 가지는 구조는 고굴절과 저굴절 물질을 각각 $\lambda/4n$ 의 두께로 증착하는 DBR이 있다. 자연에서는 모르포 나비 날개의 구조가 DBR과 상당히 비슷한 구조를 가지고 있는데, Fig. 2에서 이러한 비슷한 두 구조의 반사 스펙트럼 시뮬레이션을 통해 두 구조가 상당히 비슷한 반사 스펙트럼을 가지고 있다는 사실을 알 수 있고, 두 구조 모두 파장이 450 nm 에서 반사율이 가장 높게 나타나고 모르포 나비 날개 모방구조에서는 파장이 503 nm 에서 DBR은 530 nm 에서 반사율이 낮게 나타나는 사실을 알 수 있다. 따라서 우리는 두 가지 비슷한 반사 특성을 가지는 구조의 반사율이 극대화와 극소화가 일어나는 파장에서 E-Field 분포의 비교를 통한 반사특성 비교와 외부 환경 굴절률 변화에 대한 반사 스펙트럼 변화 비교를 통해 두 구조의 유사점 및 차이점을 분석하였다.

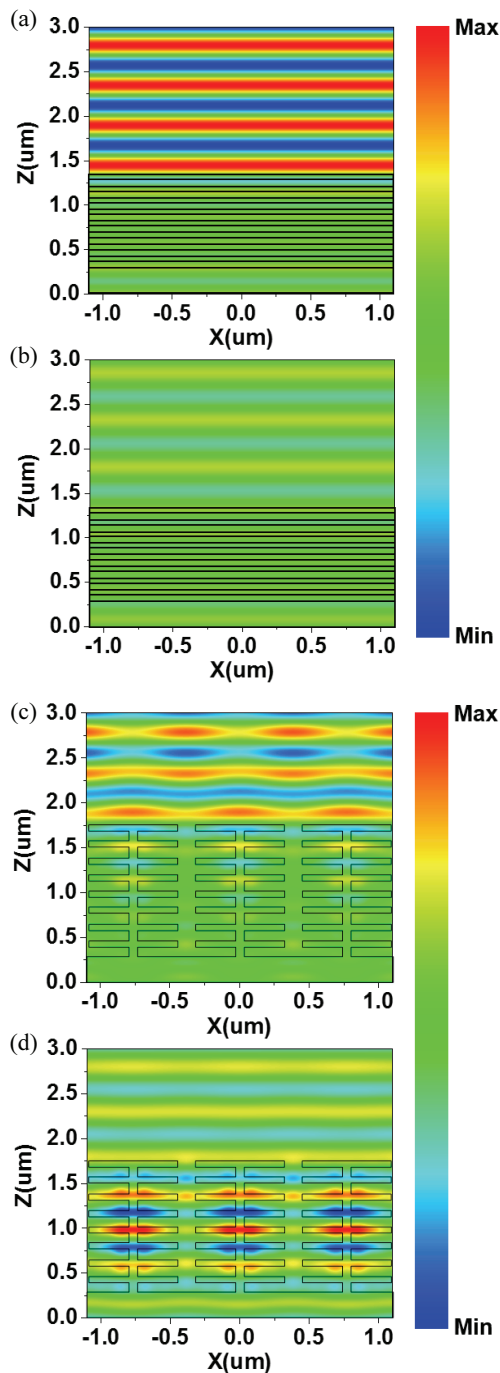


Fig. 3 E-Field profiles of DBR: (a) High reflectance wavelength (at 450 nm), (b) Low reflectance wavelength (at 530 nm) and Morpho structures for (c) High reflectance wavelength (at 450 nm), (d) Low reflectance wavelength (at 503 nm)

2.1 E-Field 비교

앞서 언급한대로, DBR 과 모르포 나비 날개 모방 구조는 입사파와 반사파의 보강 및 상쇄 간섭으로 인해 반사율이 최대화 혹은 최소화된다. Fig. 3은 두 구조에서 보강 및 상쇄 간섭 파장에서의 E-Field 분포를 보여준다.

Fig. 3(a)은 DBR구조에서 보강 간섭이 일어날 때의 E-Field 분포를 보여주며 그에 따라 투과되는 E-Field 성분은 거의 없는 것을 보여준다. 그에 반해, Fig. 3(b)의 경우, 상쇄 간섭의 E-Field 분포를 보인다.

Fig. 3(c)는 모르포 나비 날개 모방 구조의 보강 간섭이 일어날 때의 E-Field 분포를 보인다. 모르포 나비 날개 모방 구조는 DBR 과는 달리, 라멜라 표면에서의 반사에 의한 간섭과 주기적으로 반복되는 단일 모르포 나비 날개 모방 구조의 회절이 복합적으로 나타난다.

Fig. 3(d)는 모르포 나비 날개 모방 구조의 상쇄 간섭이 일어나는 파장 대역에서의 E-Field 분포이며, 이 그래프로부터 구조물을 지탱하는 릿지(Ridge)가 도파관 역할을 하면서 내부에 정상파가 생기는 사실을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 모르포 나비 날개 모방 구조의 반사 원리가 복잡하지만, 반사율이 최대화 혹은 최소화되는 부분에서는 DBR과 마찬가지로 주로 보강 및 상쇄 간섭에 의해 광학적 특징이 발생함을 알 수 있다.

2.2 외부 환경 굴절률에 대한 민감도 비교

두 가지 구조에서 반사율이 극대화 혹은 극소화되는 부분에서의 반사 특성이 주로 간섭에 의해 이루어지지만, 모르포 나비 날개 모방 구조는 외부 환경과의 접촉 면적이 넓어 외부 환경 변화에 민감한 특성을 보인다. 이를 확인하기 위해 주변 환경의 굴절률을 변화시키면서 광학적 특성을 계산하였다.

Fig. 4는 두 가지 구조의 외부환경에 대한 반사 스펙트럼이 어떻게 변화하는지를 나타낸다. Fig. 4(a)는 외부 환경의 굴절률 변화에 대한 DBR의 반사 스펙트럼의 변화이다. 이 결과는 DBR 구조의 반사 스펙트럼이 외부환경 굴절률의 변화에 대해 거의 변화하지 않음을 보인다. Fig. 4(b)는 모르포 나비 날개 구조의 외부환경 굴절률 변화에 대한 반사 스펙트럼을 보인 것이다. 이 결과는 DBR 과는 달리 외부 환경 변화에 따라 반사 스펙트럼이 오른쪽으로 이동하는 것을 보이며, 그 정도는 외부 환경 굴절률이 1에서 1.1까지 변할 때 반사 스

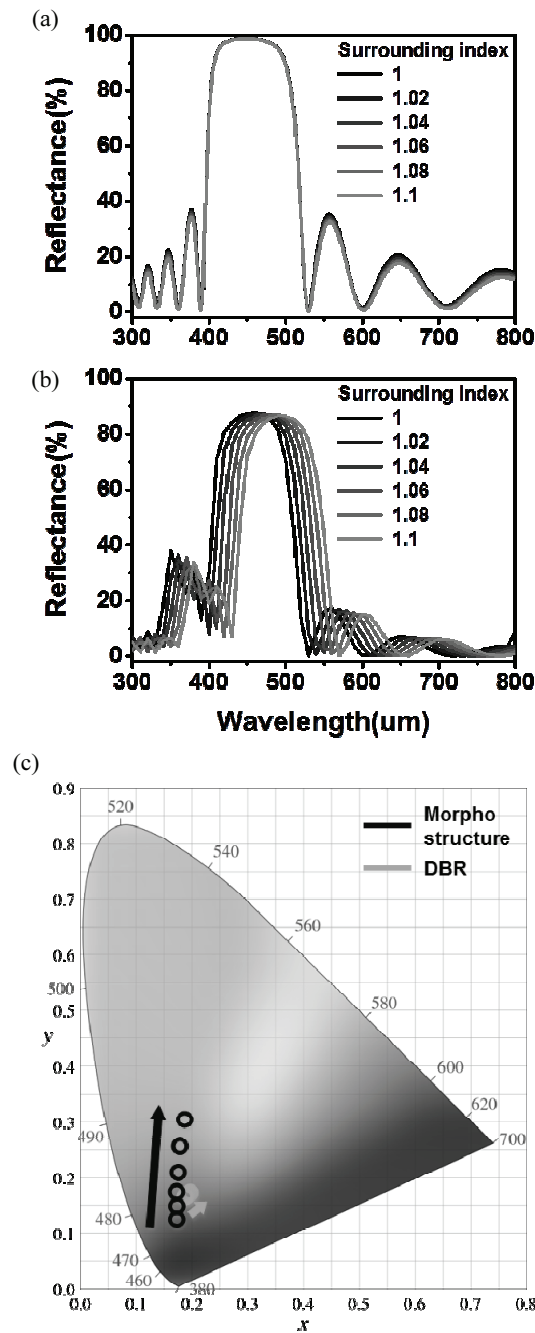


Fig. 4 Reflectance curves of two different structures ((a) DBR, (b) Morpho structure) with varying surrounding indices (From 1.0 to 1.1 with 0.02 steps), (c) CIE plots of reflectance spectra for DBR and Morpho structure, Arrows indicate directions for surround index increment

펙트럼은 약 30 nm 이동한다. Fig. 4(c)에는 이러한 외부 굴절률이 1에서1.1까지 0.02씩 변함에 따라 CIE 색 좌표에서 어떤 색을 띠는지 보여준다.

이 결과들로부터, 모르포 나비 날개 구조는 DBR 구조보다 주변 환경에 대하여 훨씬 민감한 특성을 보임을 알 수 있다. 이유는 DBR의 경우, 고굴절 물질과 저굴절 물질이 번갈아가면서 $\lambda/4n$ 의 정수배 두께로 쌓여 있지만 모르포 나비 날개 구조는 저굴절 물질의 역할을 공기가 대신 하게 되는 것에서 기인한다. 그러므로 공기 중의 굴절률이 변하게 된다면 반사 스펙트럼 또한 같이 변하게 되고 마찬가지로 우리 눈에 보이는 색도 변하게 된다.

3. 가스센서로서의 민감도 향상

모르포 나비 모방 구조는 가스 센서로 사용되기 위해 외부 환경의 변화에 대한 민감도가 높은 구조로의 최적화 모델링 및 반사 특성 분석이 이루어져야 앞서 언급한 공정의 복잡성과 비용 문제를 최소화할 수 있다.

3.1 라멜라의 개수 변화에 대한 민감도 변화

우리는 민감도를 향상하는 방법의 하나로 라멜라의 개수를 조절하였다. Fig. 5는 라멜라의 개수가 각각 4, 6, 8, 10개일 때 외부 환경 굴절률의 변화에 따른 반사 스펙트럼의 Contour Plot이다.

Fig. 5에서 라멜라의 개수와 관계없이 반사 스펙트럼이 오른쪽 방향으로 이동이 하는 정도는 거의 일정하다고 볼 수 있다. 하지만 라멜라의 수가 적어질수록 외부 환경 굴절률이 증가하면 반사율이 줄어드는 특징이 나타난다. 이는 라멜라의 개수가 적어질수록 반사하는 층이 줄어들기 때문에 라멜라와 빈 공간의 굴절률 차이 감소에 따라 반사율이 줄어드는 요인이 전체 반사율의 감소에 더 크게 기인하기 때문이다. 하지만 가스 센서로 사용할 때는

$$\Delta R = 100\% \times (R/R_0 - 1) \quad (1)$$

식(1)처럼 반사율의 변화를 측정하기 때문에 라멜라의 개수가 작아질 경우, 외부 환경 굴절률 변화에 따른 스펙트럼의 이동에 추가적으로 반사율의 감소가 생기기 때문에 식(1)의 측면에서는 더욱 큰 변화가 일어난다. 그러므로 라멜라의 개수를 줄임으로써 민감도가 향상되는 사실을 알 수 있다.^{6,13}

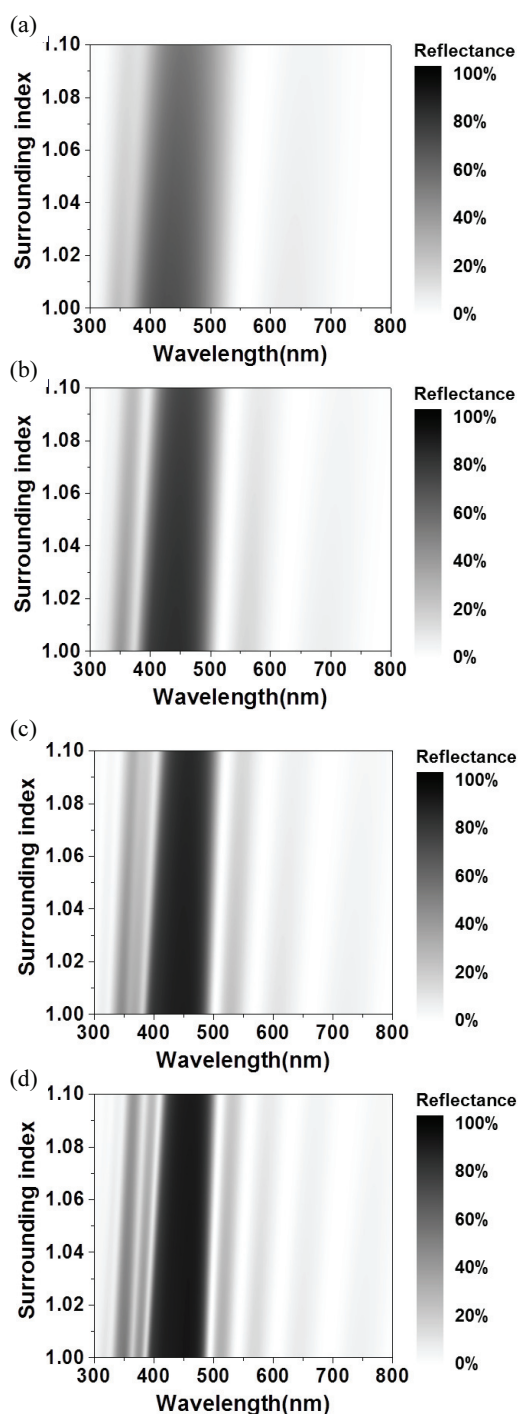


Fig. 5 Contour plot of the reflectance spectra of Morpho structures as a function of surrounding indices with varying number of lamella ((a) 4, (b) 6, (c) 8, (d) 10)

이러한 사실을 고려하여 모르포 나비 날개 모방 구조의 반사율 차이가 측정이 가능한 정도의 반사율은 유지하면서 외부 환경 굴절률에 대한 민감도를 가지는 적절한 라멜라의 개수로 설계를 해야 한다.

4. 결론

본 연구는 모르포 나비 날개 모방 구조와 비슷한 반사 특성을 가지는 DBR을 모델링하고 실제 모르포 나비를 관찰해 모르포 나비 날개 모방 구조를 모델링하여 E-Field 및 외부 환경 굴절률 변화에 대해 계산하였고 두 구조의 유사점과 차이점을 비교하였다. 유사점으로는 두 구조 모두 반사율이 극대화 혹은 극소화 되는 파장에서 반사특성은 주로 간섭에 의해서 나타나는 사실이고, 차이점에서 오는 특징으로는 DBR의 경우 외부 환경 굴절률 변화에 대해 반사 스펙트럼이 거의 변하지 않지만 모르포 나비 날개 모방 구조는 외부 환경 굴절률이 1에서 1.1까지 변할 때 전체적인 반사 스펙트럼이 오른쪽으로 약 30 nm 이동한다는 점이다. 이는 식(1)의 계산에 따라 반사율이 급격히 떨어지는 파장 500 nm 부분에서 측정을 하게되면 전체 반사 스펙트럼이 오른쪽으로 이동하면서 파장 500 nm 부분의 반사율이 급격하게 증가하여 이로 인해 반사율의 변화율이 크게 측정된다. 이를 통해 모르포 나비 날개 모방 구조는 가스 센싱을 위한 광학 센서로써의 활용이 가능하다는 사실을 알 수 있다. 또한, 모르포 나비 날개 모방 구조의 가스 센서로의 최적화 모델링에서 라멜라의 개수를 줄일수록 민감도가 높아지지만, 적정 반사율 80% 이상은 유지해야 반사되는 빛의 세기 변화를 측정하기 쉬우므로 라멜라의 개수는 6개가 적절하다는 것을 알 수 있다.

이 결과들로부터, 우리는 광학용 가스 센서로의 활용을 위한 모르포 나비 날개 모방 구조의 광학적 특성과 최적 구조를 제안한다.

후 기

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2014R1A1A1005945), 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A7036513).

REFERENCES

1. Kinoshita, S., Yoshioka, S., and Miyazaki, J., "Physics of Structural Colors," *Reports on Progress in Physics*, Vol. 71, No. 7, Paper No. 076401, 2008.
2. Wu, W., Liao, G., Shi, T., Malik, R., and Zeng, C., "The Relationship of Selective Surrounding Response and the Nanophotonic Structures of Morpho Butterfly Scales," *Microelectronic Engineering*, Vol. 95, pp. 42-48, 2012.
3. Xu, H., Wu, P., Zhu, C., Elbaz, A., and Gu, Z. Z., "Photonic Crystal for Gas Sensing," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 1, No. 38, pp. 6087-6098, 2013.
4. Fenzl, C., Hirsch, T., and Wolfbeis, O. S., "Photonic Crystals for Chemical Sensing and Biosensing," *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 53, No. 13, pp. 3318-3335, 2014.
5. Biró, L., Kertész, K., Vértesy, Z., and Bálint, Z., "Photonic Nanoarchitectures Occurring in Butterfly Scales as Selective Gas/Vapor Sensors," *Proc. of the International Society for Optical Engineering*, Vol. 7057, Paper No. 705706, 2008.
6. Potyrailo, R. A., Ghiradella, H., Vertiatichikh, A., Dovidenko, K., Cournoyer, J. R., et al., "Morpho Butterfly Wing Scales Demonstrate Highly Selective Vapour Response," *Nature Photonics*, Vol. 1, No. 2, pp. 123-128, 2007.
7. Wang, H. and Zhang, K.-Q., "Photonic Crystal Structures with Tunable Structure Color as Colorimetric Sensors," *Sensors*, Vol. 13, No. 4, pp. 4192-4213, 2013.
8. Siddique, R. H., Diewald, S., Leuthold, J., and Hölscher, H., "Theoretical and Experimental Analysis of the Structural Pattern Responsible for the Iridescence of Morpho Butterflies," *Optics Express*, Vol. 21, No. 12, pp. 14351-14361, 2013.
9. Siddique, R. H., Hünig, R., Faisal, A., Lemmer, U., and Hölscher, H., "Fabrication of Hierarchical Photonic Nanostructures Inspired by Morpho Butterflies Utilizing Laser Interference Lithography," *Optical Materials Express*, Vol. 5, No. 5, pp. 996-1005, 2015.
10. Aryal, M., Ko, D.-H., Tumbleston, J. R., Gadisa, A., Samulski, E. T., et al., "Large Area Nanofabrication of Butterfly Wing's Three Dimensional Ultrastructures," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 30, No. 6, Paper No. 061802, 2012.
11. Potyrailo, R. A., Bonam, R. K., Hartley, J. G., Starkey, T. A., Vukusic, P., et al., "Towards Outperforming Conventional Sensor Arrays with Fabricated Individual Photonic Vapour Sensors Inspired by Morpho Butterflies," *Nature Communications*, Vol. 6, Paper No. 7959, 2015.
12. Kinoshita, S. and Yoshioka, S., "Structural Colors in Nature: The Role of Regularity and Irregularity in the Structure," *ChemPhysChem*, Vol. 6, No. 8, pp. 1443-1459, 2005.
13. Yun, Y. H., Hur, S., and Lee, S. C., "Nano-Bio Sensor Technology and Characteristics," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 25, No. 11, pp. 7-14, 2008.