

https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.1.225

IIBC 2017-1-30

# 비대칭 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 격자를 사용한 고효율 GMR 컬러 필터의 구현

## Implementation of Highly Efficient GMR Color Filter using Asymmetric $\text{Si}_3\text{N}_4$ Gratings

호광춘\*

Kwang-Chun Ho\*

**요약** 본 논문에서는 높은 효율의 GMR(guided-mode resonant) 컬러 필터를 제안하고 구현하였다. GMR 컬러 필터는 서로 보완적인 고정 격자와 이동 격자가 포함된  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{air}$  층으로 구성하였다. 제안한 소자는 정확한 등가 전송선로 이론(RETT)에 기초한 수치 해석과 서브 파장 대역에서 동작하는 격자구조를 사용하여 설계하였다. 수치해석 결과, GMR 컬러 필터는  $0.45\mu\text{m} \sim 0.55\mu\text{m}$  범위에서 blue-green 컬러에 대하여 그리고  $0.6\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$  범위에서 red 컬러에 대하여 약 35 nm의 동조특성을 보였다. 또한, 컬러 필터는 blue, green 그리고 red 컬러의 중심 주파수에서 각각 99%, 98%, 99%의 효율을 가지고 약 8 nm의 대역폭을 나타내었으며, 앞선 논문들에서 보고된 내용보다 더 높은 효율을 보여주었다.

**Abstract** In this paper, a highly efficient GMR(guided-mode resonant) color filter is proposed and implemented. The GMR color filter consists of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{air}$  layers containing complementary fixed and mobile gratings. The device is designed using RETT(rigorous equivalent transmission-line theory) and a grating structure operating in subwavelength. The numerical result reveals that the color filter has a tuning capability of about 35 nm over the  $0.45\mu\text{m} \sim 0.55\mu\text{m}$  range for blue-green color and across  $0.6\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$  range for red color. Furthermore, The color filters have a spectral bandwidth of about 8 nm with efficiencies of 99%, 98%, and 99% at the center wavelength of blue, green, and red color, respectively, and these are higher efficiencies than reported in the literature previously.

**Key Words** : GMR color filter, Diffraction Gratings, Rigorous equivalent transmission-line theory

### 1. 서론

텔레비전, 컴퓨터, 휴대 전화, 디지털 카메라 및 멀티미디어 프로젝터와 같은 전자 장치들은 이미지 디스플레이를 구동시키기 위하여 다양한 컬러 필터를 포함하고 있다. 그중에서 액정 표시 장치(LCD)는 주로 white

light 하에서 특정 색을 투과시키는 염료 계 컬러 필터를 사용하는 중요 기술이지만, 낮은 효율과 광 흡수로 인한 가열 및 불완전한 색상 선택성 때문에 널리 사용하는데 한계가 있다<sup>[1]</sup>. 한편 격자구조 기반의 컬러 필터들은 LCD의 단점을 극복하기 위한 흥미로운 대안이며, 잠재적으로 고효율 및 향상된 대역폭을 선택할 수 있는 기능

\*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과  
접수일자 2016년 2월 24일, 수정완료 2017년 1월 17일  
게재확정일자 2017년 2월 3일

Received: 24 February, 2016 / Revised: 17 January, 2017 /  
Accepted: 3 February, 2017

\*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr  
Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

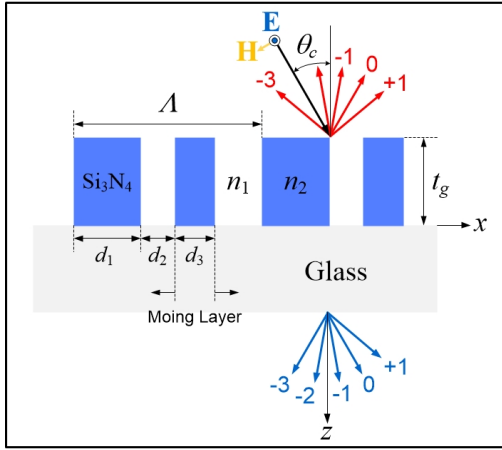


그림 1. 비대칭 형태를 갖는 GMR 컬러 필터구조의 구성도.  
Fig. 1. Schematic diagram of GMR color filter structure with asymmetric profile.

을 갖고 있는 소자이다<sup>[2,3]</sup>.

이러한 격자구조 기반의 컬러 필터들은 투과형, 반사형 또는 반 투과형으로 분류할 수 있다. 투과형과 반 투과형은 내부 광원이 필요하지만, 반사형은 주변광과 함께 작동할 수 있으며 주변에 조명이 있는 경우 대부분의 빛을 반사하는 데 매우 효율적이다. 특히 반사형 GMR 컬러 필터는 조정하기 쉬운 좁은 대역폭으로 인하여 입력 광을 고효율로 이용할 수 있고, 색상 순도를 쉽게 향상시키는데 응용할 수 있다<sup>[4,5]</sup>.

최근 포토닉스와 결합된 MEMS<sup>[6]</sup> 기술은 tunable 디스플레이 소자 개발에 흥미로운 솔루션을 제공하고 있다. GMR 컬러 필터에서 공진 파장의 tuning 및 스위칭은 격자 레이어 또는 주변 미디어의 굴절률, 레이어 두께, 주기 또는 종횡비(aspect ratio)를 비롯한 물리적 매개 변수를 변화시킴으로써 구현할 수 있다. Shu et al.은 기계적 힘에 의해 측면 방향 또는 종 방향으로 변위 될 수 있는 2차원 도파관 격자로 구성된 tunable 구조의 소자를 보고 하였다<sup>[7]</sup>. 즉, 각각의 주기적인 도파관의 결합을 기계적으로 변경함으로써 GMR 특성을 바꾸어 스펙트럼 tuning이 가능함을 보였다. Carr et al.은 이론적으로 공진 조건 하에서 측면 방향을 따라 변형 가능한 나노 기계적 격자를 연구하였고, 고정된 입력 파장을 사용하여 격자의 측면 방향 이동이 소자의 강도 변조 및 편광 효과를 발생시킬 수 있음을 발견하였다<sup>[8]</sup>. 더욱이 최근에는, Kanamori et al.이 비트 스트림(bit stream)에서 선택된 파장을 add/drop하기 위하여 에어 갭 (air gap) 내에서

MEMS 액추에이터를 통하여 이동시킬 수 있는 2 차원 편파 GMR 필터를 제작하였다<sup>[9]</sup>.

본 논문에서는 tuning 가능한 GMR 나노 전자 기계 (nanoelectromechanical: NEMS) 소자를 기반으로 하는 디스플레이 컬러 필터를 제안한다. 이 소자는 서브 파장 (subwavelength) 대역에서 높은 전파 회절 차수가 발생하지 않고 오직 0-차 영역에서 작동하는 장치이다. 또한, 저 손실 표본을 사용하여 가시 스펙트럼 영역에서 NEMS/MEMS 튜닝 가능한 GMR 박막의 작동을 이론적으로 조사하는데 그 비중을 두었다.

요약하면 본 논문에서는 디스플레이 시스템용으로 변조 가능한 GMR 컬러 필터를 제안하고, 정확한 등가 전송선로 이론(RETT)<sup>[10]</sup>을 사용하여 유리 기판 위에 설치된 주기적인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 격자 소자에 대한 GMR 컬러 필터 특성을 수치해석하고 그 결과를 제공한다. 그리고 격자 구조의 굴절률 형태를 개념적으로 NEMS/MEMS 구동 방식으로 변경함으로써 가시 스펙트럼 내에서 높은 수준의 파장 가변성이 달성될 수 있다는 것을 보여준다.

## II. 비대칭 격자구조의 특성

비주기적인 패턴의 격자 구조로 구성된 GMR 컬러 필터의 모드 특성을 분석하기 위하여 격자 패턴에 대한 Fourier 확장 (expansion) 특성을 정의해야 한다. 그림 1에서 보듯이, 굴절률  $n_2$  인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와  $n_1$  인 air로 구성된 격자 구조의 굴절률은 아래와 같이 Fourier 급수로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r(x) = \sum_n \epsilon_n e^{i \frac{2n\pi}{\Lambda} x} \quad (1)$$

여기서, Fourier 계수  $\epsilon_n$ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_n &= \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \epsilon_r(x) e^{-i \frac{2n\pi}{\Lambda} x} dx \\ &= (\epsilon_{g1} - \epsilon_{g2}) \left[ F_1 \text{sinc}(nF_1) \right. \\ &\quad \left. + F_3 \text{sinc}(nF_3) e^{-in\pi(2M+F_3-F_1)} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

위의 식에서  $\Delta\epsilon = (n_2)^2 - (n_1)^2$ 이고 0-번째 Fourier 계수  $\epsilon_0$ 는

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= \frac{1}{\Lambda} \int_0^\Lambda \varepsilon_r(x) dx \\ &= \varepsilon_{g1}(F_1 + F_3) + \varepsilon_{g2}[1 - (F_1 + F_3)]\end{aligned}\quad (3)$$

와 같이 정의된다. 식 (2), (3)에서  $M = F_1 + F_2$  와  $F_i = d_i/\Lambda$ 은  $x$ 축을 따라 구성된 격자구조의 종횡비 (aspect ratio: 각 격자 부분을 주기로 나눈 값)을 나타낸다.

결국, 식 (1)에 정의되고 그림 1에 도시된 패턴의 격자 구조에 대한 Fourier 급수를 사용하여 RETT의 고유치 문제 (eigenvalue problem)로부터  $z$ -축을 따라 전파하는 회절 모드들의 전파상수를 결정할 수 있으며, 그 모드들의 반사/투과 특성(즉, 컬러 필터 특성)을 자세하게 분석할 수 있다.

본 논문의 초점은 비대칭 격자 구조를 갖는 공진 요소에 의존하는 가시영역의 스펙트럼 필터 구현에 있다. 대칭 격자 구조에서 GMR 현상에 기초한 stop-band를 선택할 수 있는 기준과 규칙이 여러 논문에서 언급되어 왔다. 대칭 구조의 경우 stop-band( $\alpha = 0$ )는 오직 한쪽 가장자리에서 나타난다. 여기서  $k_{zn} = (\beta + i\alpha) + 2n\pi/\Lambda$ 는 격자구조의 전파 상수이다. 그러나 비대칭 구조를 사용하면 정지 대역의 양 가장자리에서  $\alpha = 0$ 인 GMR 특성을 얻을 수 있으며 이로 인하여 고효율의 컬러 필터 설계가 가능하다. 이때 고려된 비대칭 격자 구조는 식 (1)에 주어진 Fourier 급수 형태로 나타낼 수 있다.

### III. 고효율 GMR 컬러 필터의 특성

본 논문에서 제안한 tunable GMR 컬러 필터는 일반적인 상태에서 stop-band의 각 가장자리에서 공명을 나타내는 비대칭 격자 구조를 갖는다. 그러나 2장에서 언급하였듯이 격자 구조가 동적 기계 tuning을 통하여 대칭 특성에 접근하면 한쪽 가장자리의 공명이 사라진다. 그림 1은 수직 입사된 TE 모드에 대한 서브 파장 GMR 소자의 개략적인 모습과 반사/투과된 공간 모드들을 보여준다.

그림에서 보듯이, 비대칭 격자 구조는 air ( $n_1 = 1$ )와  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $n_2 = 2.1$ )로 구성된 층으로 설계하였으며, 굴절률이 1.4인 유리 기판위에 형성하였다. 격자 구조의 고 굴절률 ( $n_2$ ) 부분 중 하나는 고정되어 있으며 다른 부분은 표시한 것과 같이 MEMS 작동을 사용하여 이동 가능하다.

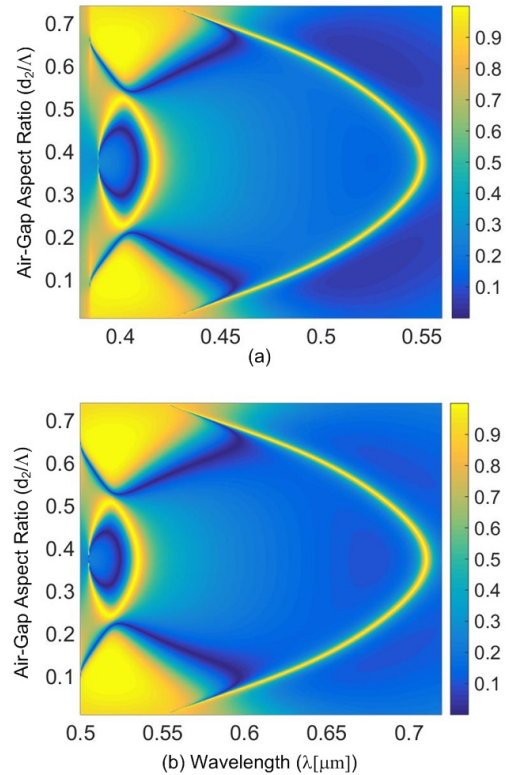


그림 2. (a) Blue-green 컬러 필터와 (b) Red 컬러 필터의 파장과 air-gap 종횡비에 따른 반사율.  
 Fig. 2. (Color Online) Reflection contour along variation of wavelength and air-gap aspect ratio of (a) blue-green color filter, and (b) red color filter.

여기서 각 단위 셀에 대한 주기( $\Lambda$ ), 두께( $t_g$ ) 및 종횡비  $F_1$ 과  $F_3$ 은 고정되어 있다고 가정하였고 장치의 작동은 tuning 변수인  $F_2$ 만으로 제어된다. 즉,  $F_2$ 를 변화시킴으로써 격자 구조의 굴절률 분포 및 대칭성이 변화된다.

먼저, 격자 구조의 굴절률에 대한 Fourier 급수인 식 (1)과 그림 1에 도시된 tunable GMR 컬러 필터를 설계하기 위하여 본 논문에서 적용한 RETT의 타당성을 검토하였다. 참고문헌 [11]에서 주어진 비대칭 GMR 구조에 대하여 수치해석 하였다. 참고문헌에서와 같이 가시 스펙트럼의 blue-green 및 red 부분에서 장치의 작동을 확인하기 위하여 두 종류의 매개 변수가 선택되었다. 두 종류 모두에서  $F_1 = 0.15$ ,  $F_3 = 0.1$ 이며 TE 모드가 수직 입사된 white light에서 컬러 필터가 작동하였다고 가정하였다. blue-green의 경우  $\Lambda = 0.385 \mu\text{m}$  와  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$  로 red의 경우  $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$  와  $t_g = 0.25 \mu\text{m}$  로 설정하였다.

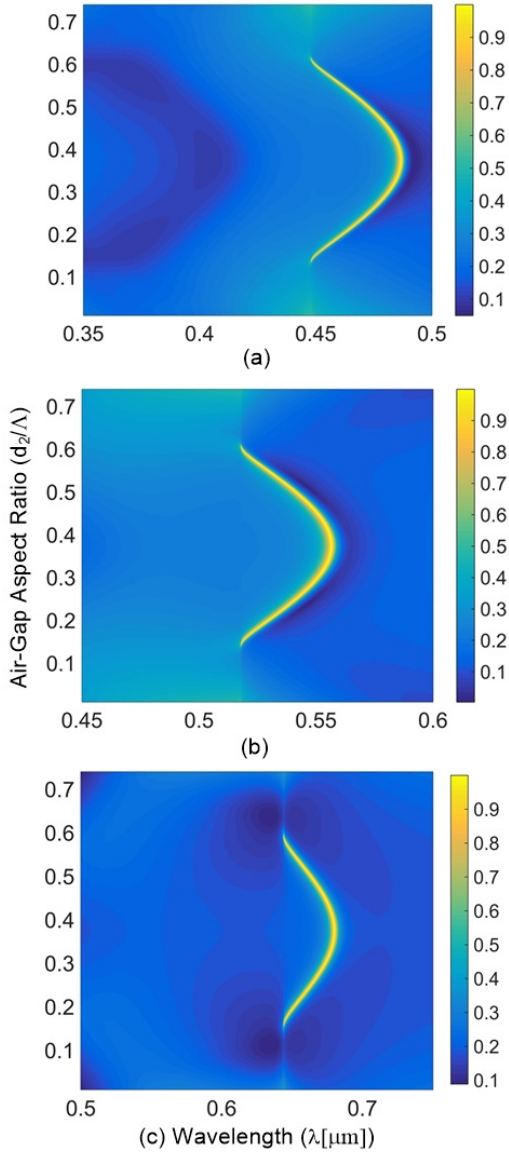


그림 3. (a) Blue, (b) Green, (c) Red 컬러 필터의 파장과 air-gap 종횡비에 따른 반사율.

Fig. 3. (Color Online) Reflection contour along variation of wavelength and air-gap aspect ratio of (a) blue, (b) green, and (c) red color filter.

수치해석 결과 그림 2에서 보듯이 참고문헌 [11]과 매우 유사한 결과를 나타내었다. 즉, 파장이 짧아짐에 따라 보다 높은 공진 모드의 출현으로 인하여 2 차 분기가 나타나는 패턴을 보였다. 또한  $F_2 \approx 0$ 에서 누설 모드가 혼합되어 발생하는 광대역 반사 영역이 나타났으며, 반사

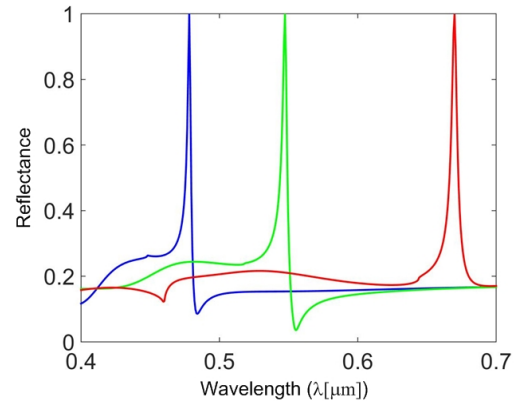


그림 4. 그림 3에서 선택한 air-gap 종횡비( $d_2/\Lambda$ )에 대한 blue, green, red 컬러 필터의 반사율.

Fig. 4. (Color Online) Reflectance of blue, green and red color filters for air-gap aspect ratio( $d_2/\Lambda$ ) selected in Fig. 3.

율의 대칭점인  $F_2 \approx 0.375$ 를 중심으로  $\text{TE}_1$  형태의 공진 leaky 모드로 인하여 높은 반사율을 갖는 두 번째 대역이 나타났다. 이러한 타원형 대역을 구성하는 누설 모드 ( $\text{TE}_0$  및  $\text{TE}_1$ )들은 주로 첫 번째 회절 차수( $\pm 1$ )에 의하여 발생하고 구성됨을 수치해석으로 확인하였다.

다음으로, 본 논문에서 제안한 유리 기판 위에 설치된 주기적인  $\text{Si}_3\text{N}_4$  격자 소자의 GMR 컬러 필터 특성을 수치해석하고 그 결과를 도시하였다. Blue의 경우 격자 주기는  $\Lambda = 0.32 \mu\text{m}$ , green의 경우  $\Lambda = 0.37 \mu\text{m}$ , red의 경우  $\Lambda = 0.46 \mu\text{m}$ 와 같이 설정하였으며 격자 두께는  $t_g = 0.25 \mu\text{m}$ 로 고정하였다. 그림 3(a)에서 보듯이, blue 파장 대역인  $\lambda = 0.45 \mu\text{m} \sim 0.485 \mu\text{m}$ 에서 blue 컬러 필터는 높은 반사율을 나타냈다. 그리고 그림 3(b)의 green 컬러 필터의 경우에는 green 파장 대역인  $\lambda = 0.518 \mu\text{m} \sim 0.558 \mu\text{m}$ 에서 높은 반사율을 갖는 대역이 나타났으며, 그림 3(c)의 red 컬러 필터의 경우에는 red 파장 대역인  $\lambda = 0.645 \mu\text{m} \sim 0.681 \mu\text{m}$ 에서 높은 반사율을 나타내었다. 또한, blue, green, 그리고 red 컬러 필터 모두 반사율의 대칭점인  $F_2 \approx 0.375$ 를 중심으로  $F_2 = 0.14 \sim 0.615$  영역에서 높은 반사율 대역이 나타났다. 그러므로  $F_2 \approx 0.235$ 에 해당하는  $x$ 축 방향으로  $d_3$  층이 이동하여 발생된 blue 컬러 필터의 tuning 범위는 약  $0.035 \mu\text{m}$ , green 컬러 필터는 약  $0.04 \mu\text{m}$  그리고 red 컬러 필터는 약  $0.036 \mu\text{m}$ 를 나타내었다. 더욱이, 유

리 기판이 없는 그림 2의 결과와 비교하여 보면 유리 기판 위에 설치된 주기적인  $\text{Si}_3\text{N}_4$  격자 소자의 GMR 컬러 필터가 고차 회절 차수에 기인한 광대역 반사 특성이 발생하지 않았다. 또한, 파장이 짧아짐에 따라 보다 높은 공진 모드의 출현으로 인하여 생성하는 2 차 분기 패턴이 발생하지 않았다. 결국, 본 논문에서 제시한 구조는 매우 안정적이고 우수한 협 대역 특성의 blue, green, 그리고 red GMR 컬러 필터를 구현하고 있다고 할 수 있다.

마지막으로, 본 논문에서 제시한 GMR 컬러 필터의 대역 특성을 분석하였다. 이를 위하여 그림 3의 2 차원 맵으로부터 선택한 중횡비 값( $F_2 = 0.28$ )에서 발생하는 blue, green 및 red 컬러 필터에 대한 반사율을 도시하였다. 그림 4에서 보듯이, 공진 주파수는 수 나노미터의 유용한 대역폭으로 잘 형성되어 tuning 시 협 대역 특성이 잘 유지되고 있음을 보여주고 있다. 또한, 컬러 필터는 blue, green 및 red 컬러의 중심 주파수에서 각각 99%, 98%, 99%의 효율을 가지고 약 8 nm의 대역폭을 나타내었으며, 앞선 논문들에서 보고된 결과보다 더 높은 효율을 보여주었다.

제시된 GMR 컬러 필터가 주로 TE 편광을 위하여 설계되었지만 TM 편광에 대한 이들의 동작이 광 시스템 설계 시에 중요 할 수도 있다. 비록 본 논문에서는 TM 편광에 대한 수치해석 결과를 도시하지 않았지만 컬러 필터 특성이 TE 편광과 유사하게 안정적으로 발생함을 보였다. 단지 중횡비  $F_2$ 의 대칭점 주변에서 반사율이 불연속 특성이 나타남을 보였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 유리 기판 위에 설치된 주기적인  $\text{Si}_3\text{N}_4$  격자 소자의 GMR 효과에 기초한 tunable 컬러 필터를 제안하였다. 컬러 필터는 서브 파장, 나노 스케일 기능을 갖춘 주기적 층으로 설계하였다. 또한, MEMS 유형의 작동을 적용하여 두 개의 격자 구성 요소 사이에 상대적인 움직임을 통하여 컬러 필터의 대역 응답을 조정할 수 있음을 보였으며, 중횡비의 대칭성을 수정하면 공진 파장이 급격하게 변화됨을 확인하였다. 2차원 tuning 맵에 대한 수치해석 결과, 이 구조가 최소한의 움직임으로 가시 스펙트럼의 blue, green 및 red 컬러 영역에서 약  $0.035 \mu\text{m} \sim 0.04 \mu\text{m}$  tuning 할 수 있음을 보였으며, 반

사율은 협 대역 선폴을 갖는 공진 형태의 특성을 나타냈다.

결론적으로, 기계적 tuning을 통하여 일정한 반사 효율을 유지하면서 직접 공진 파장을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 기본 아이디어는 다른 재료를 이용한 가시광선 영역의 소자 설계로 확장할 수 있으며, 다른 주파수 대역의 조정 가능한 장치를 설계하는데 적용할 수 있다. 또한, 광범위하게 조정 가능한 격자 구조 기반 RGB GMR 컬러 필터는 NEMS/MEMS 기반 디스플레이 시스템의 훌륭한 잠재적인 대안이라 할 수 있다.

#### References

- [1] R. W. Sabnis, "Color filter technology for liquid crystal displays," *Displays*, Vol. 20, No. 3, pp. 119 - 129, 1999.
- [2] 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*, Vol. 16, No. 4, pp. 2374 - 2380, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.002374>
- [3] Y. Kanamori, M. Shimono, and K. Hane, "Fabrication of transmission color filters using subwavelength gratings on quartz substrate," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 20, pp. 2126 - 2128, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.883208>
- [4] S. S. Wang and R. Magnusson, "Theory and applications of guided-mode resonance filters," *Appl. Opt.* Vol. 32, No. 14, pp. 2606 - 2613, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.32.002606>
- [5] R. Magnusson and Y. Ding, "MEMS tunable resonant leaky mode filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 14, pp. 1479 - 1481, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.877578>
- [6] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, 2nd ed. (CRC press, 2002).
- [7] W. Shu, M. F. Yanik, O. Solgaard, and S. Fan, "Displacement-sensitive photonic crystal structures based on guided resonances in photonic crystal slabs," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, pp.

1999–2001, 2003.

DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1563739>

- [8] D. W. Carr, J. P. Sullivan, and T. A. Friedman, “Laterally deformable nanomechanical zeroth-order gratings: anomalous diffraction studied by rigorous coupled-wave theory,” *Opt. Lett.*, Vol. 28, pp. 1636–1638, 2003.

DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.28.001636>

- [9] Y. Kanamori, T. Kitani, and K. Hane, “Control of guided resonance in a photonic crystal slab using microelectromechanical actuators,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, pp. 031911, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2431452>

- [10] K. C. Ho, “Diffraction Analysis of Multi-layered Grating Structures using Rigorous Equivalent Transmission-Line Theory,” *The J. of IIBC*, Vol. 15, No. 1, pp. 261–267, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.261>

- [11] R. Magnusson and M. Shokoh-Saremi, “Widely tunable guided-mode resonance nanoelectromechanical RGB pixels,” *Opt. Express* Vol. 15, No. 17, pp. 10903–10910, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.15.010903>

## 저자 소개

### 호 광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 전자정보공학과 교수

<주관심분야 : Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.