

Polyperiodic-hole-array Plasmonic Color Filter for Minimizing the Effect of Angle of Incidence

Ki Won Jeong and Yun Seon Do[†]

School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

(Received February 11, 2020; Revised March 12, 2020; Accepted March 24, 2020)

In this paper we propose a plasmonic color filter with a novel nanopattern. The suggested pattern, called a “polyperiodic hole array” (PPHA), is introduced to solve the angle dependence of the optical response that originates from the periodic structure. We set the diameter and period of the hole to make a green color filter, and set the unit-cell size and metal and dielectric thicknesses in consideration of the propagation length and skin depth. The periodic hole arrays are locally rotated to make a PPHA pattern, resulting in a globally aperiodic yet partially periodic pattern. As a result, compared to a general pattern, the PPHA nanostructured color filter has a maximum 40% improvement in spectral shift when the angle of incidence is increased from 0° to 30°. Transmittance reduction was also alleviated by 30%. This work will improve the performance of nanostructured color filters and help with nanotechnology being applied industrially to imaging devices, including displays and image sensors.

Keywords: Optics, Plasmonic color filter, Surface plasmon, Extraordinary optical transmission
OCIS codes: (250.5403) Plasmonics; (240.6680) Surface plasmons; (120.7000) Transmission

입사각의 영향을 최소화한 다결정 주기 구멍 배열 플라즈모닉 컬러 필터의 설계

정기원 · 도운선[†]

경북대학교 IT대학 전자공학부
Ⓞ 41566 대구광역시 북구 대학로 80

(2020년 2월 11일 받음, 2020년 3월 12일 수정본 받음, 2020년 3월 24일 게재 확정)

본 논문에서는 주기적인 구멍배열(periodic hole array, PHA) 패턴을 가진 나노금속구조 컬러필터의 문제점인 입사각의 각도에 따른 컬러필터 중심파장의 이동을 해결하기 위해 새로운 구멍 패턴인 polyperiodic hole array (PPHA)를 제시한다. 먼저 녹색 파장대역 컬러필터를 만들기 위해 구멍의 직경과 주기를 정했으며 propagation length와 skin depth를 고려해 단위셀의 크기, 금속과 유전체의 두께를 설정했다. PPHA 패턴을 만들기 위해 주기적인 구멍배열을 국부적으로 회전시켜 전체적으로는 비주기적이지만 부분적으로 주기적인 패턴을 만들었다. 그 결과 PHA 패턴과 대비하여 PPHA 패턴 나노금속구조 컬러필터는 입사각이 0°에서 30°까지 증가하였을 때 파장의 이동도가 최대 40% 개선되었다. 본 연구를 통해 나노금속구조 컬러필터의 성능을 향상시킬 수 있으며 디스플레이, 이미지 센서 등 이미징 디바이스 분야에 적용시켜 산업적으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

Keywords: 광학, 플라즈모닉 컬러 필터, 표면 플라즈몬, 특이 광 투과
OCIS codes: (250.5403) Plasmonics; (240.6680) Surface plasmons; (120.7000) Transmission

I. 서 론

컬러필터는 빛에서 인간이 인식할 수 있는 가시광선 영역을 분류하는 특성을 가지고 있으며 이러한 특성은 액정 디스플레이, 이미지 센서 등 이미징 디바이스 분야에 사용되고 있다. 하지만 일반적으로 널리 사용되고 있는 컬러필터는 안료와 염료를 사용하여 제작되기 때문에 빛, 열 및 화학물질

노출에 의해 색이 변하거나 필터성능이 저하된다. 이런 내구성 문제는 디스플레이의 수명에 직접적인 영향을 끼친다. 더불어 일반적인 컬러필터 제작에 사용되는 포토 리소그래피, 잉크젯 프린팅은 제작할 수 있는 화소의 크기에 한계가 있기 때문에 두께가 얇아지고 화소의 크기가 작아지는 이미징 디바이스의 동향에 적합하지 않다¹⁾.

이와 같은 일반적인 컬러필터의 문제점을 보완하기 위해

[†]E-mail: yuns.do@knu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0715-8033

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

나노구조를 활용한 컬러필터가 연구되어왔다. 나노구조 컬러 필터는 나노구조를 이루는 물질의 모양, 크기, 주기에 따라 특정한 빛의 파장을 필터링할 수 있다. 그렇기 때문에 나노 구조를 이용하면 빛을 흡수하기 위해 화학성분에 의존하는 일반적인 컬러필터에 비해 내구성이 강하고 focused ion beam (FIB) milling, imprinting, electron beam and nanosphere lithography 등의 설계기술을 사용하여 나노 단위로 작은 화소의 컬러필터를 만들 수 있다. 이런 장점으로 인해 나노구조 컬러필터는 다양한 분야(홀로그래프, 센서, 디스플레이, 의료 등)에 적용되어 연구되고 있으며 기존의 필터를 대체할 수 있다²⁻⁴⁾.

특히 금속을 이용해 연구되고 있는 나노구조 컬러필터에는 표면 플라즈몬 공명(surface plasmon resonance, SPR)⁵⁾이 발생한다. SPR은 금속 박막으로 입사되는 빛과 금속박막 표면의 자유전자의 진동 운동이 일치할 때 발생하는 공진 현상이다. 공진된 전자기파는 표면을 따라 전파하며 이를 propagating surface plasmon라 한다. 또한 격자, 구멍 배열과 같은 금속 국소 표면에서는 빛에 의해 금속 나노 입자의 분극 현상이 발생하는데 이를 국소 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance, LSPR)이라고 한다⁶⁾. 이런 두 특성, 즉 propagating surface plasmon과 LSPR 그리고 구멍을 통해 투과하는 빛이 상호 작용하여 나노금속구조 컬러필터에는 특이 광 투과(extraordinary optical transmission, EOT) 현상⁷⁻¹⁰⁾이 발생하고 컬러필터의 역할을 한다.

나노금속구조 중 1차원 격자 금속구조 필터¹¹⁾는 금속표면에서 SPR이 발생하고 1차원 격자 틈에서 LSPR이 발생해 필터로 사용된다. 하지만 금속구조가 한 방향으로 반복되기 때문에 입사광의 편광방향에 따라서 색이 변한다는 단점이 있다. 또한 금속-유전체-금속구조¹²⁾를 이용한 공진기는 금속과 유전체 계면에서 SPR이 발생하지만 유전체의 두께에 따라서 필터링 대역이 결정되기 때문에 색깔별로 컬러필터의 두께가 불연속적이고 공정 과정이 복잡하다. 반면에, 2차원 주기 구멍배열(periodic hole array, PHA)을 가진 광학필터는 금속 박막에 뚫린 구멍의 직경과 배열 주기에 따라서 중심파장이 결정되기 때문에 적색, 녹색 및 청색 필터가 모두 평탄하며 2차원으로 구멍이 배열되어 편광의 영향이 적다는 장점이 보고되어 1D 격자 나노금속구조 필터와 금속-유전체-금속 구조의 단점을 보완할 수 있다¹³⁻¹⁷⁾.

하지만 PHA 패턴 나노금속구조 컬러필터는 입사광의 각도가 커질수록 투과도가 낮아질 뿐만 아니라 필터링되는 빛의 파장대역이 장파장으로 이동하여 색깔이 변한다는 단점이 있다⁷⁾. 나노금속구조 컬러필터를 사용한 디스플레이의 입사광각에 따라 필터링 색상이 달라지는 특성은 다수가 사용하는 대면적 디스플레이 혹은 다양한 방향에서 정보를 취합하는 이미지 센서 등에 더욱 큰 단점이 될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 “polyperiodic hole array (PPHA)”라는 새로운 구멍배열의 패턴을 제안한다. PPHA 패턴을 이용한 2차원 구멍배열을 가진 플라즈모닉 컬러필터는 입사광각이 30°까지 커졌을 때 파장의 이동이 PHA

패턴을 이용한 플라즈모닉 컬러 필터와 비교하여 투과도 피크의 이동이 최소 6.78%에서 최대 40% 감소하며 개선됐다. 본 연구는 PPHA 패턴이 나노금속구조 플라즈모닉 컬러필터의 실제 산업 상용에 기여할 것이라 기대한다.

II. 2차원 구멍배열 나노금속구조 컬러필터의 설계 방법 및 입사광각에 따른 중심파장 변화

그림 1(a)는 2차원 구멍배열(PHA 패턴) 나노금속구조 컬러필터를 도식화한 것이다. 이 컬러필터를 제작하기 위해 먼저 유리판(SiO₂) 위에 감광액을 코팅한 뒤 레이저 간섭 리소그래피, 전자빔 리소그래피 등의 방법으로 감광한 뒤 식각하여 구멍기둥 배열을 형성한다. 이후 알루미늄(Al)을 열 증착 방법으로 쌓은 후 lift off 방법으로 나머지 감광액을 제거하여 구멍배열을 만든 뒤 위에 silicon dioxide (SiO₂)를 증착하여 만들 수 있다¹⁸⁾. 또한 이 패턴은 유리판에 Al을 먼저 증착한 뒤 감광액을 코팅하고 리소그래피, 식각 공정을 통해 구멍배열을 만든 뒤 알루미늄을 식각하고 나머지 감광액을 lift off하여 만들 수 있다¹⁹⁾. 금속에 알루미늄을 사용한 이유는 금, 은에 비해 비용이 저렴할 뿐만 아니라 400~500 nm 파장영역에서 플라즈마 주파수(plasma frequency, ω_p)가 다른 물질에 비해 높아 가시광선 영역에서 광 손실이 더 낮으며 가공에 용이하기 때문이다. 더불어 두 공정 모두 금속의 구멍

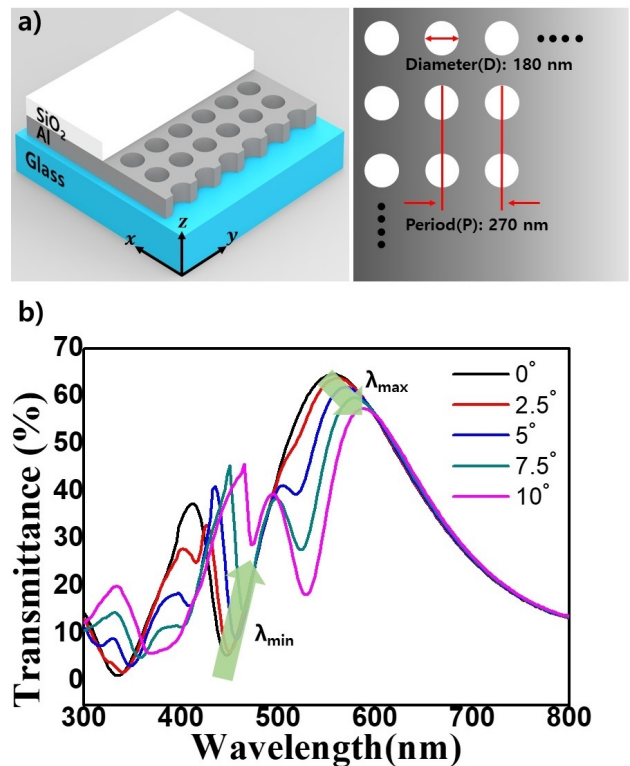


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the conventional periodic hole array (PHA) nanostructured color filter (whole structure and top view of the hole array). (b) Transmittance spectra of the PHA filter according to the angle of incidence (0-10°).

배열은 SiO₂에 의해 채워진다. 금속 구멍배열 위에 SiO₂를 증착하는 이유는 금속을 중심으로 상하부에 같은 유전체가 위치하여 각 계면에서 동일한 SP 모드를 발생시키기 때문이다. 덕분에 EOT는 같은 파장대역에서 더욱 강해진다¹⁹. 구멍을 채우는 것은 ALD (atomic layer deposition), 열증착법(thermal evaporation) 등의 conformal deposition 방법 등 특별한 패터닝 과정 없이 단순히 박막 증착으로 박막을 형성하여 구현될 수 있어 구멍 부분을 비우는 것보다 공정성이 훨씬 간단하다. 또한 Al의 두께와 유사하거나 그 이상 증착될 경우 최종 소자의 표면이 평탄해져 추가적인 산란효과 등으로 효율이 떨어지는 것을 방지할 수 있다.

본 연구에서는 컬러필터를 설계하고 수치해석을 위해 3D finite-difference time domain method (FDTD Solutions, Lumerical Inc., Canada)을 사용했으며 나노금속구조에 의한 z축 방향으로 투과되는 광의 특성을 측정했다. x축은 Anti-symmetric, y축은 Symmetric으로 설정하여 구멍배열 패턴이 무한히 반복되게 설정하였고 z축은 Perfectly matched layer (PML) 경계 조건으로 설정하여 무한한 표면을 갖도록 설정했다. 무한한 유리기판에서 금속나노구조로 입사한 광원은 300~800 nm 대역 평면파로 조사하였고 빛의 입사각이 모든 파장 대역에 동일하게 적용하기 위해 plane wave type은 Broadband fixed angle source technique (BFAST)로 설정하였다.

PHA 패턴 나노금속구조 컬러필터의 통과 파장대역은 구멍의 크기, 배열주기에 따라 결정된다. 그림의 D 와 P 는 나노금속구조의 설계 변수이며 D 는 구멍의 직경, P 는 구멍배열의 주기이다. 본 연구에서는 550 nm 파장대역의 컬러필터를 기준으로 투과도 변화를 실험하였다. 550 nm 파장을 통과시키기 위해 나노금속구조의 설계변수인 D 는 180 nm, P 는 270 nm로 설정하였다. 또한 통과된 파장 투과도 피크와 반치폭을 고려해서 알루미늄 두께를 50 nm로 설계하였으며 알루미늄 위에 증착한 SiO₂는 식 (1)²⁰을 참고해 유전체의 SP에 대한 skin depth를 계산한 뒤 50 nm로 설정하였다. Skin depth (z_{SP})는 전파하는 surface plasmon이 전파방향에 수직으로 영향을 주는 길이를 의미한다.

$$z_{SP} = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{|\epsilon'_m| + \epsilon''_m}{\epsilon_d^2} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 ϵ'_m 는 금속의 유전율 중 real 값이며 ϵ''_m 는 금속 유전율의 imaginary 값이다. 그리고 ϵ_d 는 유전체의 유전율을 의미한다²⁰.

그림 1(b)는 설계된 나노금속구조 컬러필터의 입사광각(θ)을 0°에서 10°로 2.5° 단위로 변화시킴에 따른 투과도 스펙트럼 변화를 가시광선 영역에서 3차원 FDTD 방법으로 계산한 것이다. 나타난 투과 스펙트럼에서는 다양한 특징을 확인할 수 있다. 먼저 구멍배열이 있는 금속필름 플라즈몬 필터의 EOT 특성 덕분에 가시광선 범위의 특정파장 영역에서 높은 투과율을 나타낸다. 더불어 2차원 구멍배열 금속나노구

조의 투과 스펙트럼 피크 위치($\lambda_{\max}(i,j)$)는 표면 플라즈몬 공진과 구멍배열의 주기적 구조를 고려한 식 (2)²¹에 의해서 예측할 수 있다.

$$\lambda_{\max}(i,j) = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (2)$$

여기서 P 는 구멍배열의 주기, ϵ_m 과 ϵ_d 는 금속과 유전체의 유전율이다. (i,j) 는 구멍배열에서의 reciprocal vector에 대응하는 공진 차수를 의미하며, 이에 따라 측정 영역에서 투과도는 (1,0) 또는 (0,1)의 1차 모드와 (1,1)의 2차 모드로 총 두 개의 피크가 나타난다. 이 중 장파장 쪽의 피크($\lambda_{\max}(1,0)$)가 더 높은 투과도를 보인다. 에너지가 낮은 장파장 영역에서 광학모드들 간의 상호작용은 더 활발하게 일어나기 때문에 장파장에서 가장 높은 투과율을 얻을 수 있다^{22,23}. 이런 가장 높은 투과율을 나타내는 피크의 위치(λ_{\max})는 식 (2)의 P , 즉 구멍배열의 주기를 바꾸어 조정할 수 있다. λ_{\max} 에서의 투과 피크는 파노 공명(Fano resonance) 모양을 나타내어 피크의 왼쪽 면은 가파르고 오른쪽 면은 덜 가파르다²⁴. Full width at half maximum (FWHM)는 182.5 nm이며 입사광각이 0°에서 10°로 변할 때 중심파장은 557.5 nm에서 장파장으로 30 nm 이동하여 587.5 nm가 되었고 투과도는 64.65%에서 7.19%p 줄어 57.45%가 되었다. 이는 입사광각이 0°일 때 대비하여 파장은 장파장 대역으로 5.3% 이동한 것이며 투과도는 11.1% 감소한 것이다. 추가적으로 입사광각이 커지면 0°일 때 피크였던 지점(λ_{\max})을 포함한 파장대역의 투과도가 낮아지고 투과도가 낮았던 지점(λ_{\min})은 투과도가 높아지는 특성을 보였다. 특히 중심파장 대역(λ_{\max})은 입사광각이 10°일 때 투과도가 약해지면서 아래로 볼록한 골이 생기고 입사광각이 0°일 때의 피크 59.169%와 비교해서 28.15% 수준으로 떨어진 18.203%까지 감소한 것을 확인할 수 있었다.

그림 2(a)는 설계된 PHA 패턴 나노금속구조 컬러필터에 수직으로 평면파를 입사했을 때 피크 투과도를 나타내는 557.5 nm에서 측정된 컬러필터 단면의 전기장 분포도를 보여준다. 표면 플라즈몬에 의해 금속과 SiO₂ 계면에서 E-field intensity가 높은 것을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 나노금속구조 컬러필터에서 표면 플라즈몬이 강하게 발생하는 $x = -90$ nm 영역의 E-field intensity를 측정된 것을 그래프로 나타낸 것이다. 입사광각은 0°에서 30°까지 10° 단위로 변화시켰으며 E-field intensity는 각도마다 투과도 피크가 나타난 557.5 nm, 587.5 nm, 625 nm, 665 nm 파장대역에서 측정했다. 금속 예지($z = 0$ nm, 50 nm)에서 강하게 발생한 E-field intensity는 금속 계면 위아래 깊이 방향으로 지수적으로 감쇠하였다. 특히 수직 입사한 경우 금속과 SiO₂ 계면에서 E-field intensity의 크기가 최대값인 5.12까지 상승하였으며 두께가 50 nm가 되는 지점부터 1로 수렴(오차범위 ± 0.05)하여 skin depth (z_{SP})의 길이

를 확인하였다. 이러한 경향은 입사광각이 커져도 동일하게 발견되었다.

입사광각이 커짐에 따라 금속과 SiO₂ 사이의 E-field intensity peak는 낮아졌는데 이런 현상을 그림 2(c)에서 컬러필터의 피크 투과도(peak transmittance)와 비교하였다. 입사광각이 0°

에서 10°씩 커질 때마다 E-field intensity는 각각 5.12, 4.49, 3.97, 3.24로 감소하였고 peak transmittance는 0.64, 0.57, 0.49, 0.42로 줄어들었다. 입사광각이 커지면서 발생하는 E-field intensity peak의 감소와 peak transmittance의 감소가 비슷한 경향을 보이기 때문에 입사광각이 커지면 표면 플라즈몬의 세기가 약해져 투과도 특성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

III. PPHA 패턴 설계방법 및 투과도 스펙트럼 특성

본 연구에서는 투과도의 감소와 중심파장의 이동을 줄이기 위해서 부분적으로 주기성을 가지는 패턴인 PPHA를 제안한다. PPHA는 마치 다결정 입자처럼 국부적인 주기성을 유지하면서 전체적으로는 비주기적인 패턴을 가진다. 본 연구에서는 PPHA를 패턴을 만들기 위해 2차원 구멍배열 나노금속 구조 컬러필터를 4등분하여 각 사분면을 x축으로 회전시킨다. 더불어 PPHA 패턴을 만들기 위하여 회전시키는 단위셀의 구멍 반복횟수는 투과도 피크를 PHA 패턴과 맞추어주기 위하여 표면 플라즈몬의 propagation length (δ_{SP}) 식 (3)^[5]을 참고하여 지정하였다.

$$\delta_{SP} = \frac{1}{2k''_{SP}} = \frac{c}{\omega} \left(\frac{\epsilon'_m + \epsilon_d}{\epsilon'_m \epsilon_d} \right) \frac{(\epsilon''_m)^2}{\epsilon''_m} \quad (3)$$

Propagation length란 금속과 유전체 사이에서 발생한 표면 플라즈모닉 웨이브가 이동할 때 에너지가 금속에 흡수되는데 이때 에너지가 모두 흡수되기 전까지 전파되는 길이를 의미한다. 식 (3)에서 c 는 빛의 속도, ω 는 빛의 각 주파수, ϵ'_m 는 금속의 유전율의 real 값이며 ϵ''_m 는 금속 유전율의 imaginary 값이다. 또한 식의 ϵ_d 는 금속과 인접해 있는 유전체의 유전율을 의미한다. 식 (3)을 참고하여 중심파장 550 nm에 해당하는 금속과 유전체의 유전율을 적용해 전파길이를 계산한 결과 약 4123 nm가 계산되었으며 이에 해당하는 구멍의 반복횟수는 16개로 주기 270 nm를 곱해준 4320 nm는 전파길이를 포함할 수 있다. 따라서 구멍배열을 16 × 16로 할 경우 구멍배열이 완전히 주기적이지 않더라도 단위셀이 표면 플라즈모닉 공명응답을 포화시키기엔 충분하다.

그림 3(a)는 1,3 사분면만 x축을 기준으로 15° 회전하여 만든 PPHA 패턴으로 Type 1이라고 명명하였다. 그림 3(b)는 Type 1 방식으로 만든 10 × 10, 16 × 16, 18 × 18, 20 × 20 단위셀을 가지는 PPHA 패턴의 투과도 피크이며 비교해본 결과 PHA 패턴에서 투과도의 최대 값이 64.652%, 10 × 10 단위셀 구조에서는 56.24%, 16 × 16 단위셀 구조에서는 58.944%, 18 × 18 단위셀 구조에서는 59.147% 그리고 20 × 20 단위셀 구조에서는 59.874%로 계산됐다. 20 × 20 단위셀 구조와 비교해 1%p도 차이가 나지 않기 때문에 식 (3)에서 예측한대로 단위셀의 구멍 개수가 16 × 16가 될 때부터 투과도 피크는 포화됨을 확인할 수 있었다. 하지만 PHA 패턴 대비 약 5%p 투과도가 낮아지는데 이는 PPHA 패턴을 만들면서 줄어든

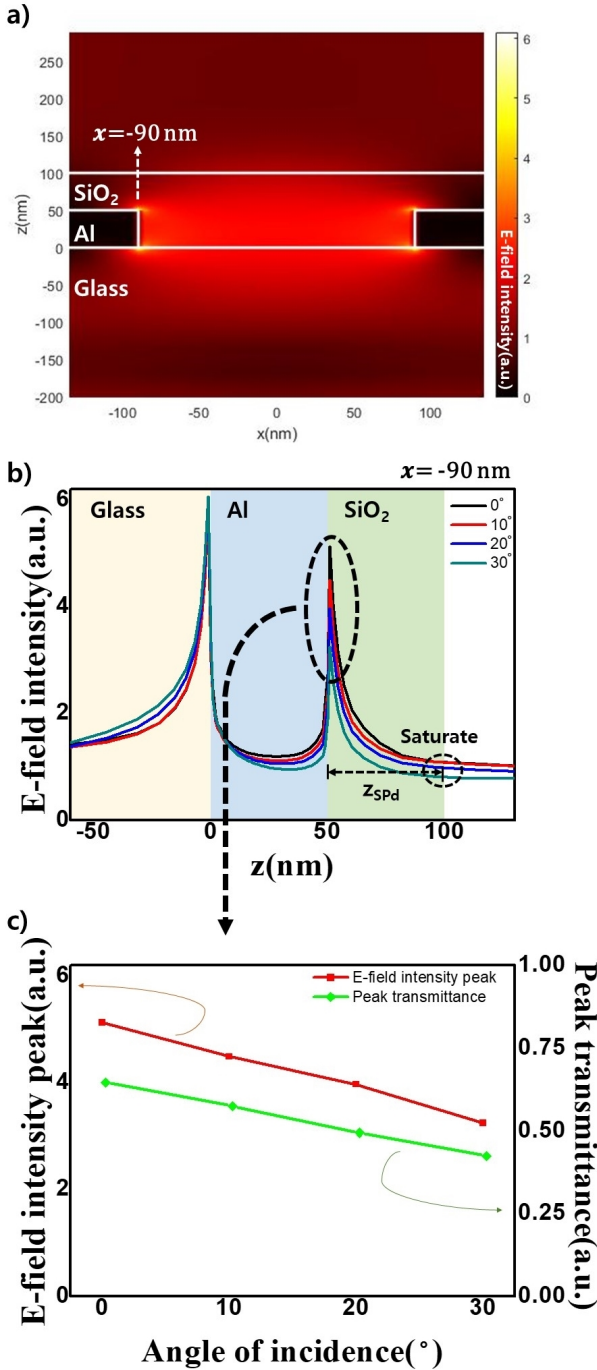


Fig. 2. (a) Cross section E-field intensity of a PHA nanostructured color filter. (b) E-field intensity of the PHA filter according to the angle of incidence (0-30°) at $x = -90$ nm. (c) Comparison of the E-field intensity peak and peak transmittance according to the angle of incidence (0-30°).

단위셀 당 구멍의 개수 때문이다. 이를 통해 본 연구에서는 다른 타입의 PPHA 패턴도 단위셀 구조를 16×16 으로 지정하여 설계한 뒤 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 4(a)는 Type 1로 명명한 PPHA 패턴을 16×16 단위셀 구조로 구성한 것이다. 그림 4(b)는 Type 2로 명명하였으며 1,3사분면을 x 축에 대하여 12.5° , 2,4사분면을 -22° 회전시켜 각 사분면의 계면에 최대한 많은 구멍을 위치하였다. Type 1

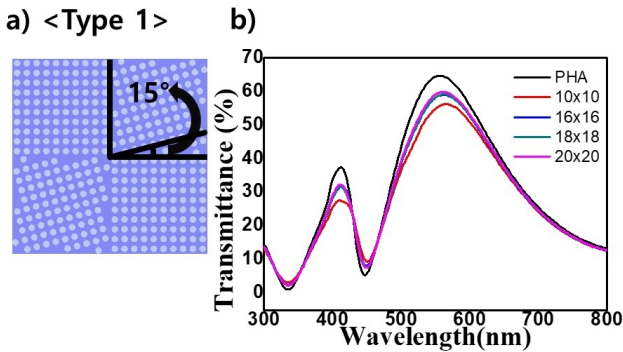


Fig. 3. (a) Polyperiodic hole array pattern of Type 1, and each quadrant has 10×10 holes (1 and 3 quadrants were rotated by 15° with respect to the x axis). (b) Transmittance spectra in case of the normal incidence.

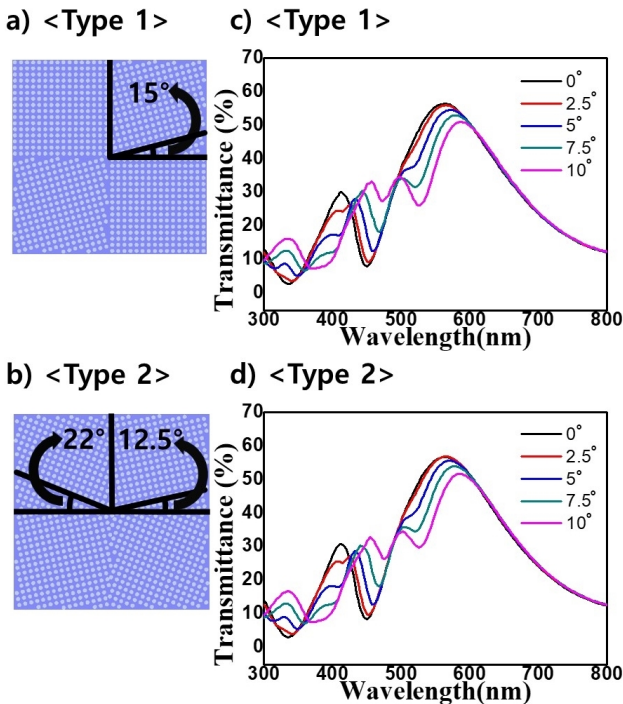


Fig. 4. Polyperiodic hole array pattern in which each quadrant has 16×16 holes. (a) Type 1 (1 and 3 quadrants were rotated by 15° with respect to the x axis). (b) Type 2 (1 and 3 quadrants were rotated by 12.5° , and 2 and 4 quadrants were rotated by -22° with respect to the x axis). (c) Transmittance spectra of Type 1 according to the angle of incidence. (d) Transmittance spectra of Type 2 according to the angle of incidence ($0-10^\circ$).

은 모든 사분면에 984개의 구멍이 뚫려있고 Type 2는 978개의 구멍이 뚫려있다. 각 패턴의 구멍 개수는 PHA 패턴의 구멍이 1024개인 것에 비교해서 각각 96%, 95.5%이며 두 방식 모두 각 사분면 단위셀이 16×16 이기 때문에 투과도의 경우 큰 하락이 없을 것이라고 예상했다.

그림 4(c), 4(d)는 Type 1과 Type 2의 입사광각에 따른 투과도 스펙트럼 변화이다. 두 패턴 모두 PHA 패턴을 가지는 필터와 같이 Fano resonance 모양을 나타냈다. Type 1의 투과도 스펙트럼의 FWHM은 197.5 nm 이며 입사광각이 0° 에서 10° 로 변할 때 중심파장은 562.5 nm 에서 장파장으로 27.5 nm 이동하여 590 nm 가 되었는데 이는 0° 대비 4.88% 변한 것이다. 투과도 크기는 59.169%에서 5.83%p 줄어 53.339%가 되었다. Type 1 역시 중심파장 대역은 입사광각이 커질 때 투과도가 약해지면서 아래로 볼록한 골이 생기고 0° 일 때의 피크와 비교해서 절반보다 작은 24.523%까지 감소한 것을 확인할 수 있었다. Type 2의 경우 FWHM은 195 nm 로 PPHA 패턴은 PHA 패턴과 비교했을 때 FWHM이 12.5~15 nm 더 커졌다. 하지만 입사광각이 0° 에서 10° 로 변할 때 중심파장은 562.5 nm 에서 장파장으로 22.5 nm 이동하여 585 nm 가 되어 4%가 변했다. 투과도의 크기는 56.7%에서 5%p 줄어 51.66%가 되었다. 입사광각이 변하면서 중심파장 대역에 아래로 볼록하게 생긴 골의 투과도는 입사광각이 0° 일 때의 피크와 비교해서 절반 수준인 29.878%까지 감소했다.

아래로 볼록하게 생기는 골은 투과도의 감소와 함께 중심파장을 이동시키면서 피크가 여러 개로 나뉘는데 이런 경향은 dispersion map에서 두드러지게 확인된다. 그림 5(a)와 5(b)는 PHA 패턴 금속나노구조 컬러필터와 PPHA 패턴 컬러필터 중 Type 2의 dispersion map이며 해당 그래프는 입사광각이 30° 까지 1.25° 씩 변했을 때의 투과도를 계산하여 만들었다. 그림 5(a)에서 PHA 패턴의 경우 입사광각이 0° 일 때 550 nm 에서 600 nm 파장대역의 투과도가 강했다가 입사광각이 커지면서 해당 영역의 투과도가 감소하면서 투과도가 높은 지점이 장파장 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 더불어 입사광각이 1.25° 씩 변하여 30° 까지 증가했을 때 피크는 2.5 nm 에서 5 nm 씩 장파장 대역으로 이동하였다. 결과적으로 입사광각이 30° 일 때의 피크는 입사광각이 0° 일 때

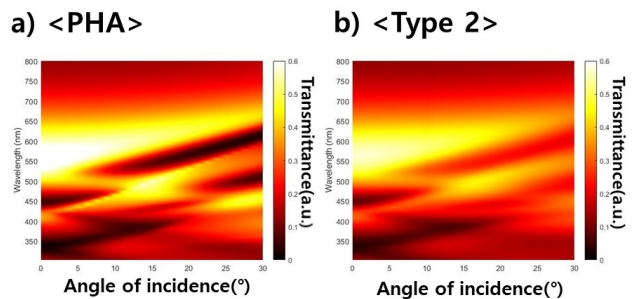


Fig. 5. Dispersion map. (a) Conventional periodic hole array nanostructured color filter. (b) Polyperiodic hole array nanostructured color filter (Type 2).

의 피크 위치인 557.5 nm에서 107.5 nm 차이 나는 662.5 nm로 이동하였다. 반면에 그림 5(b)에 나타난 PPHA 패턴 Type 2의 dispersion map의 경우 비슷한 대역에서 투과도 피크가 나타나지만 해당 영역의 투과도가 비교적 조금 약해진다. PHA 패턴에서와 같이 PPHA 패턴도 입사광각이 1.25°씩 변하면 투과도 피크가 2.5 nm에서 5 nm 이동하였지만 2.5 nm만 이동하는 횟수가 더 높아 입사광각이 30°일 때의 피크는 입사광각이 0°일 때의 피크 위치인 562.5 nm에서 100 nm 차이 나는 665 nm에 나타났다. PHA 패턴과 비교했을 때 PPHA 패턴은 투과도 피크의 이동이 감소하는 구간이 발생했고 해당 구간을 비교했을 때 투과도 피크의 이동은 최소 6.97%에서 최대 40%까지 감소하였다.

PHA 패턴과 PPHA 패턴의 입사광각에 따른 투과도 스펙트럼을 비교했을 때 투과도 피크의 경우 PPHA 패턴에서 조금 낮아지는 경향을 보였는데 이는 PPHA 패턴의 경우 단위 셀에 포함되는 구멍의 개수가 PHA 패턴에 비해 줄었기 때문이라고 보인다. 입사광각이 0°에서 10°까지 커지면 FWHM의 경우 Type 1은 8.2%, Type 2는 6.8% 더 넓어졌지만 입사광각에 따른 피크의 이동은 PHA 패턴의 투과도 이동에 비하여 Type 1은 8.3% 줄어들었으며 Type 2는 25% 줄어들었음을 확인하였다. 이동한 중심파장의 투과도 감소 역시 PPHA 패턴에서 개선되었으며 PHA 2차원 구멍배열에서의 감소에 비하여 Type 1은 18.75%, Type 1은 30% 완화된 것이다. 더불어 입사광각이 0°일 때의 피크가 위치한 대역에서 발생한 아래로 블록한 골의 경우 PHA는 피크 대비 28.15%까지 떨어졌지만 Type 1은 41.44%, Type 2는 52.69%까지 감소하며 투과도의 감소한 정도가 크게 줄었음을 확인할 수 있었다. 이러한 이동도와 투과도 감소의 완화는 결과적으로 투과도 스펙트럼의 피크가 나뉘어졌을 때 입사광각이 0°일 때 투과도가 높았던 파장대역의 투과도 감소를 줄여주었다. 더불어 입사광각이 1.25°씩 30°까지 커지는 경우 PPHA 패턴 중 특성이 더 좋았던 Type 2를 PHA 패턴과 비교하였으며 투과도 피크의 이동은 최소 6.97%에서 최대 40%까지 감소하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 2차원 구멍배열 나노금속구조 컬러필터에서 입사광각이 변할 때 중심파장이 장파장으로 이동하는 것을 줄이기 위하여 PPHA라는 구멍배열 패턴을 설계하고 FDTD 방법을 이용하여 PPHA 패턴 컬러필터의 투과도 특성을 계산하였다. 국부적으로 주기적이지만 전체적으로 비주기적인 PPHA 패턴을 설계하기 위해 2차원 구멍배열을 4사분면으로 나누는 뒤 각 사분면을 단위 셀로 하여 x축으로 회전시켰으며 표면 플라즈몬 공명이 충분히 포화된 투과도 피크를 얻어내기 위해 표면 플라즈몬의 전파길이 특성을 이용해 각사분면 단위 셀의 구멍 개수를 16 × 16으로 정할 수 있었다. PPHA 패턴을 두 가지 타입으로 나누어 실험을 진행하였는데 1,3사분면만 15° 회전하여 만든 Type 1을 통해 전파길이에 따른

투과도의 포화를 확인할 수 있었다. Type 2는 1,3사분면을 12.5°, 2,4사분면을 -22° 회전하여 만들었으며 Type 1보다 투과도 이동도가 개선되었다. 입사광각이 0°에서 10°까지 커질 때 PPHA 패턴은 PHA 패턴에 비하여 투과도는 줄어들지만 중심파장의 이동도 변화는 PHA 패턴 대비 25% 낮아지게 개선하였으며 입사광각이 커지면서 발생하는 투과도의 감소 역시 30%까지 줄어들었다. 입사광각이 0°일 때 피크가 나타나는 부분이 입사광각이 커지면서 아래로 블록하게 변하는 경향도 확인할 수 있었는데 이때 투과도 역시 PPHA 패턴이 PHA 패턴과 비교하여 1.87배 커져 투과성능이 커졌다. 입사광각이 0°에서 1.25°씩 30°까지 커질 때 PPHA 패턴은 PHA 패턴보다 중심파장 피크의 이동하는 정도가 감소하였고 결과적으로 최소 6.97%에서 최대 40% 개선되었다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 2차원 구멍배열(PPHA) 나노금속구조 컬러필터의 패턴을 통하여 일반적인 2차원 구멍배열(PHA)의 나노금속구조의 투과도 감소와 중심파장 이동을 개선시킬 수 있다. 본 연구에서 PPHA 패턴의 Type 1보다 Type 2의 시뮬레이션 결과가 개선된 것에서 알 수 있듯이 패턴의 각 사분면이 틀어진 각도와 단위셀의 구멍 개수를 조절하여 입사각 의존도 특성을 더욱 완화할 수 있을 것이라 생각한다. 이를 통해 나노금속구조 컬러필터를 실제 산업에 적용하여 광학 장치의 발전에 이바지할 것으로 예상된다.

감사의 글

This work was supported by the Basic Science Research Programs through the National Research Foundation of Korea (NRF), Ministry of Education, under Grant NRF-2018R1D1A1 B07045853.

References

1. R. W. Sabnis, "Color filter technology for liquid crystal displays," *Displays* **20**, 119-129 (1999).
2. H. S. Lee, Y. T. Yoon, S. S. Lee, S. H. Kim, and K. D. Lee, "Color filter based on a subwavelength patterned metal grating," *Opt. Express* **15**, 15457-15463 (2007).
3. S. Yokogawa, S. P. Burgos, and H. A. Atwater, "Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications," *Nano Lett.* **12**, 4349-4354 (2012).
4. B. Zeng, Y. Gao, and F. J. Bartoli, "Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters," *Sci. Rep.* **3**, 2840 (2013).
5. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength Optics," *Nature* **424**, 824-830 (2003).
6. K. A. Willets and R. P. V. Duyne, "Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing," *Annu. Rev. Phys. Chem.* **58**, 267-297 (2007).
7. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* **391**, 667-669 (1998).

8. F. V. Beijnum, C. Rétif, C. B. Smiet, H. Liu, P. Lalanne, and M. P. V. Exter, "Quasi-cylindrical wave contribution in experiments on extraordinary optical transmission," *Nature* **492**, 411-414 (2012).
9. H. Liu and P. Lalanne, "Microscopic theory of the extraordinary optical transmission," *Nature* **452**, 728-731 (2008).
10. H. Liu and P. Lalanne, "Comprehensive microscopic model of the extraordinary optical transmission," *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 2542-2550 (2010).
11. T. Xu, Y.-K. Wu, X. Luo, and L. J. Guo, "Plasmonic nano-resonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging," *Nat. Commun.* **1**, 59 (2010).
12. C. S. Park, V. R. Shrestha, S. S. Lee, E. S. Kim, and D. Y. Choi, "Omnidirectional color filters capitalizing on a nano-resonator of Ag-TiO₂-Ag integrated with a phase compensating dielectric overlay," *Sci. Rep.* **5**, 8467 (2015).
13. Y. S. Do, "A highly reproducible fabrication process for large-area plasmonic filters for optical applications," *IEEE Access* **6**, 68961-68967 (2018).
14. Y. G. Moon, Y. S. Do, M. H. Lee, B. Y. Hwang, D. J. Jeong, B.-K. Ju, and K. C. Choi, "Plasmonic chromatic electrode with low resistivity," *Sci. Rep.* **7**, 15206 (2017).
15. Y. S. Do and K. C. Choi, "Poly-periodic hole arrays for angle-invariant plasmonic filters," *Opt. Lett.* **40**, 3873-3876 (2015).
16. S. Chang, Y. S. Do, J.-W. Kim, B. Y. Hwang, J. Choi, B.-H. Choi, Y.-H. Lee, K. C. Choi, and B.-K. Ju, "Photo-insensitive amorphous oxide thin-film transistor integrated with a plasmonic filter for transparent electronics," *Adv. Funct. Mater.* **24**, 3482-3487 (2014).
17. Y. S. Do and K. C. Choi, "Quantitative analysis of enhancing extraordinary optical transmission affected by dielectric environment," *J. Opt.* **16**, 065005 (2014).
18. Y. H. Lee and Y. S. Do, "Optimal design method for a plasmonic color filter by using individual phenomenon in a plasmonic hybrid structure," *Korean J. Opt. Photon.* **29**, 275-284 (2018).
19. Y. S. Do, J. H. Park, B. Y. Hwang, S.-M. Lee, B.-K. Ju, and K. C. Choi, "Plasmonic color filter and its fabrication for large-area applications," *Adv. Opt. Mater.* **1**, 133-138 (2013).
20. A. K. Azad and W. Zhang, "Resonant terahertz transmission in subwavelength metallic hole arrays of sub-skin-depth thickness," *Opt. Lett.* **30**, 2945-2947 (2005).
21. H. F. Ghaemi, T. Thio, D. E. Grupp, T. W. Ebbesen, and H. J. Lezec, "Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes," *Phys. Rev. B* **58**, 6779 (1998).
22. F. Przybilla, A. Degiron, C. Genet, T. W. Ebbesen, F. de León-Pérez, J. Bravo-Abad, F. J. García-Vidal, and L. Martín-Moreno, "Efficiency and finite size effects in enhanced transmission through subwavelength apertures," *Opt. Express* **16**, 9571-9579 (2008).
23. S.-H. Chang, S. K. Gray, and G. C. Schatz, "Surface plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films," *Opt. Express* **13**, 3150-3165 (2005).
24. B. Luk'yanchuk, N. I. Zheludev, S. A. Maier, N. J. Halas, P. Nordlander, H. Giessen, and C. T. Chong, "The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials," *Nat. Mater.* **9**, 707-715 (2010).