

광파장 이하 주기를 갖는 금속 격자형 컬러필터

이홍식 · 윤여택 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과
☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

김상훈 · 이기동

엘지 전자기술원 소재재료연구소
☎ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2007년 10월 1일 받음, 2007년 11월 1일 수정본 받음)

본 논문에서는 광파장 이하의 주기를 갖는 금속 격자형 가시광선 대역 컬러필터를 제안하고 구현하였다. 이 소자는 쿼츠 기판 위의 알루미늄 금속 층에 원형 홀이 2차원으로 배열된 격자로 구성되어 있다. 격자의 구조 파라미터 즉, 금속 박막 두께, 격자 주기, 홀 크기, 홀 구성 물질의 굴절률 등이 필터의 전달특성에 미치는 영향을 분석하여 소자를 설계하였다. 특히, 격자 홀을 구성하는 물질의 굴절률을 조절함으로써 필터의 특성을 최적화하고자 시도하였다. 본 논문에서는 전자빔 직접 기록 방식을 도입하여 두 개의 소자를 구현하였는데, 이들의 설계 파라미터를 살펴보면 격자 높이는 50 nm로 동일하며, 주기는 각각 340 nm와 260 nm였다. 측정된 결과를 살펴보면, 주기가 $\Lambda = 340$ nm인 소자의 경우에 중심파장은 680 nm이고 최대 투과율은 57%였으며, 주기가 $\Lambda = 260$ nm인 소자의 경우에는 중심파장이 550 nm이고 최대 투과율을 50%였다. 특히, 계산 결과를 통하여 격자 홀을 기판과 동일한 굴절률과 동일한 물질로 채움으로써 투과효율이 15% 이상 증가함을 확인하였다.

주제어 : Sub-wavelength gratings, Color filters, Metals, Surface plasmons, Periodic structure

I 서 론

컬러필터는 CMOS 이미지 센서, 액정 디스플레이 소자, 유기 발광 다이오드 소자 등에서 가시광선 대역의 특정 색을 선택하는 핵심 요소로서 널리 사용되어 왔다.^[1-3] 이러한 컬러필터는 지금까지 주로 안료 필름을 도포하고 패터닝하여 구현되었다. 한편, 최근에 금속 박막에 광파장 이하의 주기를 갖는 1차원 격자 구조를 도입하여 가시광선 대역을 포함하는 단파장 통과 필터(즉, 적외선 차단 필터)가 보고되었다.^[3] 이러한 금속 박막패턴 구조의 필터는 반도체 소자 제작에 광범위하게 활용되고 있는 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) 공정과의 호환성이 우수하고 다른 기능 소자와의 집적이 용이하며 비용 절감 등의 많은 장점을 지니고 있다. 그러나, 1차원 금속 격자형 필터는 편광의존 특성을 지니며, 가시광선 대역의 특정 색만을 투과하는 컬러필터로 사용하기에는 적합하지 못한 문제점도 지니고 있다. 한편, 2차원 금속 격자 구조의 경우에는 국부 플라즈몬(localized surface plasmon)이 유발되어 특정 파장 대역을 통과시키는 대역통과 특성을 갖고 있으며, 광 투과율도 획기적으로 향상될 수 있다고 보고되었다.^[4-7]

본 논문에서는 광파장 이하의 주기를 갖고 2차원 구조로 배열된 홀로 이루어진 금속 격자를 이용한 가시광선 대역의 컬러필터를 제안하고 구현하였다. 격자의 설계 파라미터가

필터의 전달 특성에 미치는 영향을 이론적으로 분석한 후, 전자빔 기록 장비를 이용하여 소자를 제작하고 특성을 측정하였다. 특히, 격자의 홀(hole)을 구성하는 물질의 굴절률을 조절하여 필터의 투과효율을 향상시키고자 시도하였다.^[9,10]

II. 제안된 소자의 설계

본 논문에서는 2차원 금속 격자 기반의 적색 및 녹색 컬러 대역을 통과시키는 필터 구현을 목표로 하였다. 그림 1에는 제안된 소자의 구조가 도시되어 있다. 기판으로는 가시광선 대역에서 균일한 분산특성을 가지며 손실이 적은 쿼츠(quartz)를 사용하였으며, 격자 층으로는 전도도가 우수한 금속인 알루미늄(Al) 박막을 도입하였다. 이 격자는 금속 기판에 원형 홀(hole)이 2차원 구조로 주기적으로 배열되어 구현되었다. 이 소자에 편광되지 않은 백색 가시광선이 쿼츠 기판으로 입사하게 되면 금속 격자에 의하여 특정 가시광선 파장 대역만 투과되어 출력광으로 나오게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 격자 주기는 Λ , 홀 직경은 G , 인접한 두 홀 간의 간격에 해당하는 금속 선폭은 W , 박막 두께는 H 로 나타내어진다. 특히, 격자 주기는 가시광선 대역 광파장(약 450~700 nm) 보다 작다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 기판의 굴절률은 n_s , 금속의 굴절률은 n_m , 홀과 오버레이(overlay)를 구성하는 물질의 굴절률은 n_h 이다.

제안된 소자를 설계하기 위하여 FDTD(finite-difference time-domain) 방법 기반의 상용화된 툴인 OptiFDTD(캐나다

[†] E-mail: slee@kw.ac.kr

Optiwave사)를 사용하였다. 설계 시 사용된 Al 금속의 물질 특성은 Lorentz-Drude 모델로부터 얻어진 값을 적용하였으며, 그림 2에는 이 금속의 분산특성, 즉 파장에 따른 굴절률 ($n_m = n_r + jn_i$) 변화가 도시되어 있다.^[11] 한편, 쿼츠 기판의 굴절률은 1.5로 균일하다고 가정하였다. 설계 시 Al 박막의 두께는 실제적인 공정 조건 등을 고려하여 $H = 50$ nm로 고정하였다.

가시광선 대역의 컬러필터를 구현하기 위해서는 스펙트럼 상에서 최대 투과율을 보이는 중심파장의 위치를 결정하는 것이 중요하다. 먼저 1차원 완전 도체로 이루어진 금속 격자의 경우에는 단파장 투과 특성을 갖는데, 이 때 차단파장은 대략 $\nu_c = 2$ nm로 알려져 있다.^[3] 여기서 n 은 금속 격자의 주변 매질 굴절률이고 w 는 금속 격자 간의 간격이다. 그리고 2차원 격자의 경우에는 격자 주기, 금속의 굴절률, 주변 유전체 매질의 굴절률 등이 표면 플라즈몬 이론에 근거하여 중심파장을 결정하는 요인으로 알려져 있다.^[4] 그러나, 제안된 소자와 같이 완전 도체가 아닌 손실을 갖는 실제적인 금속으로 이루어진 2차원 격자 구조의 경우에는 격자 주기뿐만 아니

라 duty ratio, 금속 두께, 기판을 포함한 주변 매질의 굴절률 등이 복합적으로 중심파장과 투과효율에 영향을 미치기 때문에 이들 간의 관계를 이론적으로 명확하게 규정짓는 것이 매우 어렵다.^[4,8] 따라서 본 논문에서는 FDTD 기법을 이용한 수치해석을 통하여 제안된 두 소자의 설계 파라미터를 다음과 같이 결정하였다. 즉, 적색 필터로 사용될 소자 Dev I의 경우에는 $\Lambda = 340$ nm, $G = 230$ nm, $W = 110$ nm이고, 그리고 녹색 필터로 사용될 소자 Dev II의 경우에는 $\Lambda = 260$ nm, $G = 170$ nm, $W = 90$ nm이다.

다음으로 금속 격자 주변에 채워지는 기판과 동일한 굴절률을 갖는 유전체 매질이 소자의 광전달 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 즉, 홀이 비어있는 경우, 홀에만 유전체 매질로 채워진 경우, 그리고 홀뿐만 아니라 유전체 매질로 이루어진 오버레이가 형성된 경우 등의 세 가지 경우에 대하여 소자의 광응답 특성을 계산하였다. 첫째로, 홀이 비어 있는 경우에는 그림 3(a)와 3(b)에 도시되어 있는 것처럼 Dev I과 Dev II의 경우에 중심파장이 각각 ~ 630 nm와 ~ 500 nm 임을 알 수 있다. 둘째로, 홀에만 유전체 매질이 채워진 경우에는 중심파장이 장파장 쪽으로 이동하고 투과율이 약 10% 증가함을 알 수 있다. 마지막으로 홀 표면에 유전체 물질로 오버레이가 형성된 경우 투과율은 홀에만 채웠을 경우에 비해서 5% 정도 증가하였으며, 두 개의 스펙트럼 피크(peak)가

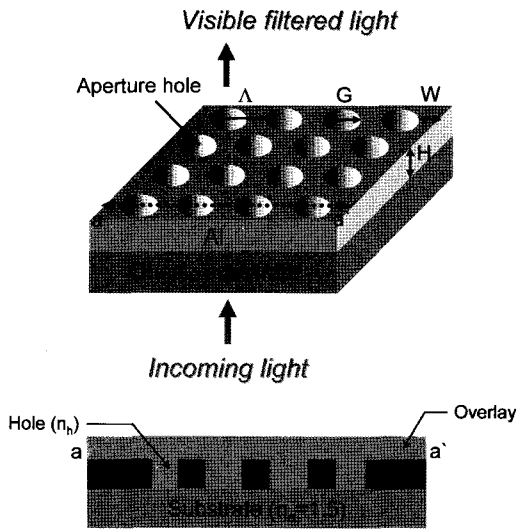


그림 1. 제안된 2차원 금속 격자형 컬러필터 구조.

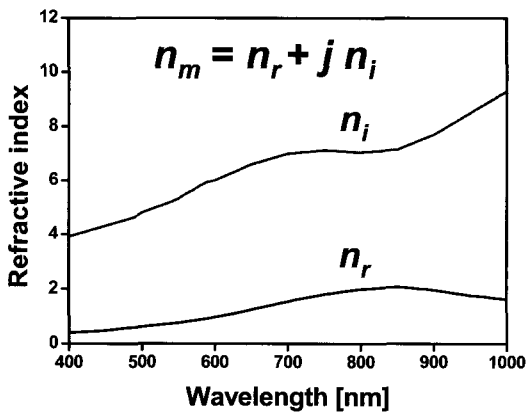
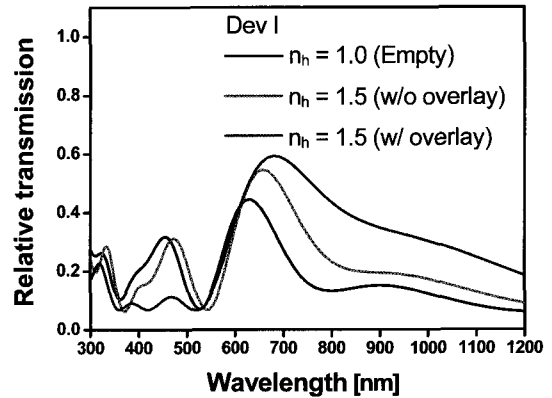
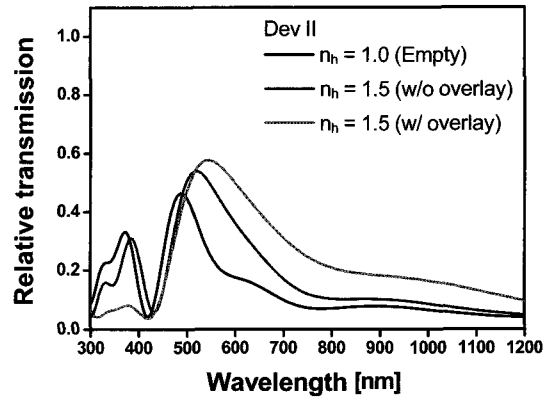


그림 2. 알루미늄 금속의 분산특성.



(a) 소자 Dev I



(b) 소자 Dev II

그림 3. 설계된 컬러필터의 전달특성.

단일 피크로 전환됨을 알 수 있다. 이것은 홀이 비어 있는 경우에 비해 홀에만 굴절률이 채워졌을 경우 그리고 홀이 채워지고 기판과 대칭적으로 오버레이가 형성된 경우에 금속 박막의 상부 및 하부 표면에 존재하는 표면 플라즈몬 공진조건들이 바뀌기 때문이다. 즉, 홀이 비어 있거나 홀만 유전체 매질로 채워진 경우에는 금속 격자 층의 상부 및 하부 표면에 존재하는 플라즈몬 모드의 에너지 부정합으로 인하여 전달특성 상에서 스펙트럼 피크가 2개 존재한다. 한편, 굴절률 정합 매질로 이루어진 오버레이가 있는 경우에는 금속 박막 상하부와 관련된 표면 플라즈몬 모드의 에너지가 정합되어 단일 스펙트럼 피크가 얻어지며 결과적으로 최대 투과효율이 향상됨을 알 수 있다.^[12] 얻어진 계산 결과를 살펴보면, 그림 3(a)에 있는 Dev I의 경우 홀을 굴절률 정합 물질로 오버레이가 형성되도록 채운 경우 최대 투과효율이 약 15% 향상됨을 알 수 있었고, 그림 3(b)에 있는 Dev II의 경우에도 투과효율이 약 12% 향상됨을 확인하였다. 또한, 중심파장도 장파장 쪽을 약 50 nm 이동하여 Dev I과 Dev II의 경우에 중심파장이 각각 ~680 nm와 ~550 nm가 되었다.

III. 소자 제작 및 특성 측정

제안된 소자의 제작공정은 그림 4에 도시되어 있다. 4인치 쿼츠 기판 위에 RF Sputter를 이용하여 Al 박막을 50 nm 두께로 증착하였다. 이 금속 박막 위에 전자빔 전용 포토레지스트(photoresist)를 도포한 후, 전자빔 장비를 이용하여 2차

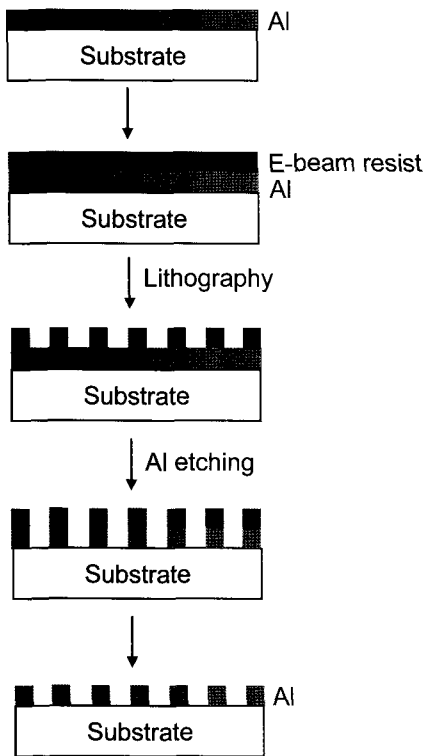
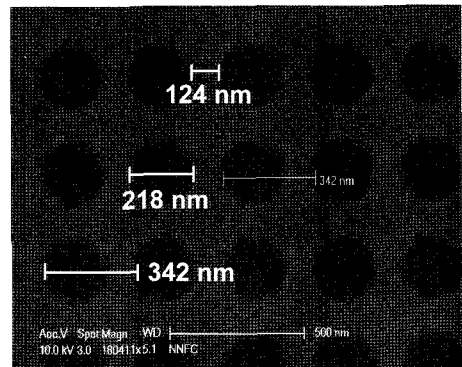


그림 4. 소자 제작공정.

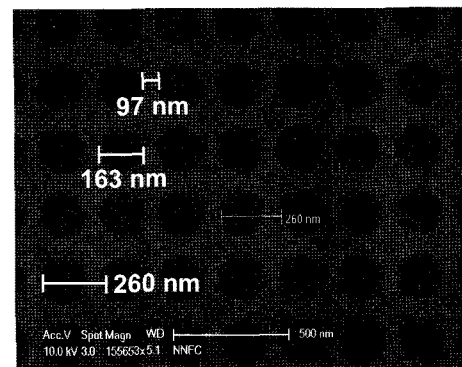
원 격자 패턴을 형성하였다. 그리고 포토레지스트 패턴을 소프트 마스크로 활용하여 금속 박막을 식각한 후 마스크 층을 제거함으로써 격자 패턴을 완성하였다. 형성된 격자 패턴의 면적은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이다. 그림 5에는 제작된 금속 격자의 전자빔조사 이미지(scanning electron micrograph)가 나타나 있다. 그림 5(a)에 있는 소자 Dev I의 경우, 측정된 격자 주기 $\Lambda = 342 \text{ nm}$, 금속 선폭 $W = 124 \text{ nm}$, 홀 직경은 $G = 218 \text{ nm}$ 이다. 그리고 그림 5(b)에 있는 소자 Dev II의 경우, 측정된 격자 주기 $\Lambda = 260 \text{ nm}$, 금속 선폭 $W = 97 \text{ nm}$, 홀 직경은 $G = 163 \text{ nm}$ 이다. 이 결과로부터 실제 소자가 설계된 대로 잘 구현되었음을 알 수 있다.

제작된 필터의 특성을 측정하기 위하여 소자를 수직방향으로 스테이지에 장착한 후, 할로젠 램프(Ocean Optics, 모델 LS-1)에서 나오는 빔을 조사하고 스펙트럼분석기(Ocean Optics, 모델 USB 4000-VIS-NIR)를 사용하여 출력 빔을 검출하였다. 그림 6은 소자 Dev I과 Dev II의 측정된 스펙트럼 응답 특성을 보여준다. Dev I의 경우에 중심파장은 약 620 nm, 3-dB 대역폭은 약 200 nm, 최대 투과 효율은 약 42%이고, Dev II의 경우에 중심파장은 약 500 nm, 3-dB 대역폭은 약 200 nm, 최대 투과 효율은 약 30%임을 확인하였다.

다음으로 금속 격자 홀이 쿼츠 기판과 유사한 굴절률을 갖는 물질로 채워진 경우의 필터 특성을 관찰하였다. 이 때, 금속 격자의 홀뿐만 아니라 상부 표면에 유전체 매질 오버레이가



(a) 소자 Dev I



(b) 소자 Dev II.

그림 5. 제작된 2차원 금속 격자형 컬러 필터의 SEM 사진.

형성된 경우를 고려하였다. 사용된 굴절률 정합 오일(Cargille Labs)의 굴절률은 588 nm 파장대역에서 $n_h = 1.5$ 이다. 그림 7에는 금속 격자의 홀이 굴절률 정합 물질로 채웠을 때의 Dev I과 Dev II에 대한 측정 및 계산된 결과가 나타나 있다. 홀을 채우기 전과 후의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 그림 7(a)의 경우에는 중심파장이 ~680 nm로 약 60 nm정도 장파장 쪽으로 이동하였으며, 최대 투과효율은 약 57%로 15% 정도 증가하였으며, 대역폭은 210 nm 정도로 유지되었

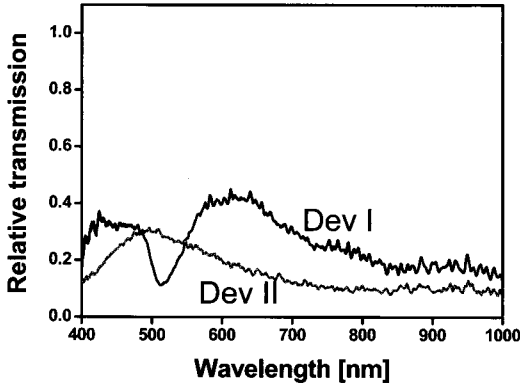
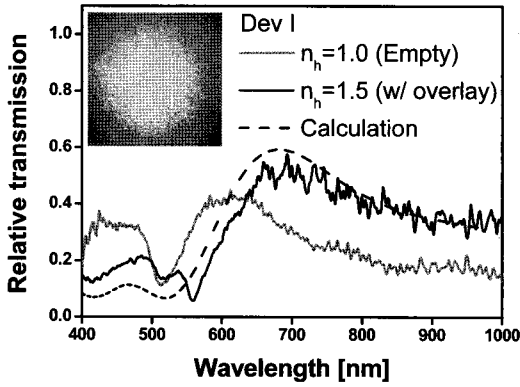
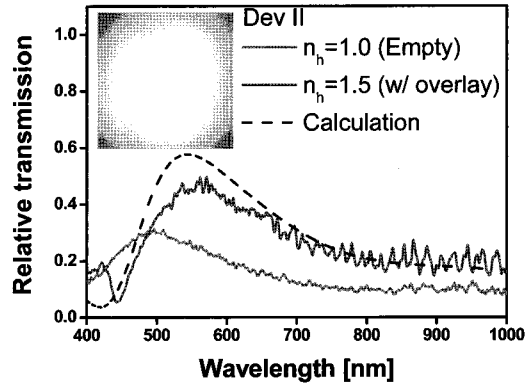


그림 6. 제작된 컬러필터의 전달특성 측정 결과.

다. 그리고 그림 7(b)의 경우에는 중심파장이 ~550 nm로 50 nm 정도 장파장 쪽으로 이동하였으며, 최대 투과효율은 약 50%로 20% 정도 증가하였으며, 대역폭은 230 nm 정도로 유지되었다. 또한, 그림 7에는 제작된 필터에 백색 가시광선이 조사되었을 때 얻어진 출력 광의 이미지가 포함되어 있다. Dev I과 Dev II의 경우에 각각 적색 및 황색 계열의 색이 나타남을 알 수 있다. Dev I의 경우에는 중심파장이 680 nm이므로 예상대로 적색 계열의 컬러를 얻었다. 한편, Dev II의 경우에는 중심파장이 녹색인 550 nm임에도 불구하고 대역폭이 비교적 넓고 롤오프(roll-off) 특성이 부족하여 황색 계열의 컬러가 얻어졌다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 색 선택도를 결정하는 롤오프 특성을 개선해야 할 것이다. 제안된 소자의 경우에는 금속 박막의 두께를 증가시켜 대역폭을 줄임으로써 가능할 것이다.^[13,14] 그림 8에는 제안된 소자의 Dev II($\Lambda = 260$ nm)의 경우에 금속 박막 두께 변화에 따른 대역폭 및 투과율 변화에 대한 계산결과가 나타나 있다. 박막 두께가 50 nm에서 200 nm로 증가함에 따라 투과율은 약 15% 감소하지만 대역폭은 240 nm에서 120 nm로 반 정도 감소하여 롤오프 특성이 향상됨을 알 수 있다. 실제 소자 제작 시에는 격자 높이와 대역폭 간에 trade-off가 존재하기 때문에 이 두 파라미터를 적절하게 조절하는 것이 필요할 것이다.

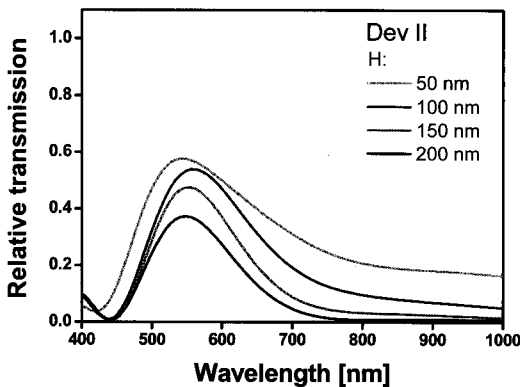


(a) 소자 Dev I

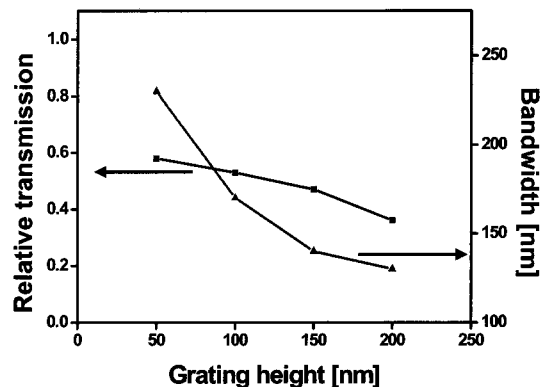


(b) 소자 Dev II

그림 7. 격자 홀이 굴절률 정합 물질로 채워졌을 경우 소자의 전달특성 및 입력 백색 가시광선에 대한 출력 컬러 이미지.



(a) 전달특성



(b) 대역폭 및 투과율 변화

그림 8. 금속 박막 두께의 증가에 따른 전달특성과 대역폭간의 관계.

IV. 결 론

본 논문에서는 2차원 금속 격자 구조를 갖는 박막형 컬러필터를 설계하고 구현하였다. 격자의 주기는 광파장 이하이며, 격자 주기와 홀을 구성하는 물질의 굴절률에 따라 필터의 중심파장이 변하고 투과특성이 상승되는 것을 확인하였다. 적색과 녹색 계열의 필터를 제작하였으며 계산 결과를 통하여 격자 홀을 기판과 동일한 굴절률과 동일한 물질로 채움으로써 투과효율이 15% 이상 증가함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노 메카트로닉스 기술 개발 사업단의 지원과 2006년도 “서울시 산학연 협력사업”의 “나노 IP/SoC 설계기술혁신 사업단”의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] F.-J. Ko and H.-P. D. Shieh, “High-efficiency micro-optical color filter for liquid-crystal projection system applications,” *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 7, pp. 1159-1163, 2000.
- [2] Y. Cho, Y. K. Choi, and S. H. Sohn, “Optical properties of neodymium-containing polymethylmethacrylate films for the organic light emitting diode color filter,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 051102-1~051102-3, 2006.
- [3] P. B. Catrysse, W. Suh, S. Fan, and M. Peeters, “One-mode model for patterned metal layers inside integrated color pixels,” *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 9, pp. 974-976, 2004.
- [4] T. Tanaka, M. Akazawa, E. Sano, M. Tanaka, F. Miyamaru, and M. Hangyo, “Transmission characteristics through two-dimensional periodic hole arrays perforated in perfect conductors,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 5A, pp. 4058-4063, 2006.
- [5] L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, K. M. Pellerin, T. Thio, J. B. Pendry, and T. W. Ebbesen, “Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, no. 6, pp. 1114-1117, 2001.
- [6] T. W. Ebbesen, H. J. Lezaec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolf, “Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays,” *Nature*, vol. 391, pp. 667-669, 1998.
- [7] J. Provine, J. Skinner, and D. A. Horsley, “Subwavelength metal grating tunable filter,” *IEEE MEMS 2006*, Istanbul, Turkey, pp. 854-857, Jan. 22-26, 2006.
- [8] H. B. Chan, Z. Marcet, D. Carr, J. E. Bower, R. Cirelli, E. Ferry, F. P. Klemens, J. F. Miner, C. S. Pai, and J. A. Taylor, “Transmission enhancement in an array of sub-wavelength slits in aluminum due to surface plasmon resonances,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 10, issue 3, pp. 143-150, 2005.
- [9] J. Olkkonen, K. Kataja, and D. G. Howe, “Light transmission through a high index dielectric-filled sub-wavelength hole in a metal film,” *Opt. Express*, vol. 13, no. 18, pp. 6980-6989, 2005.
- [10] J. Olkkonen, K. Kataja, and D. G. Howe, “Light transmission through a high index dielectric hole in a metal film surrounded by surface corrugations,” *Opt. Express* 14, 11506-11511, 2006.
- [11] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander, Jr., and C. A. Ward, “Optical properties of the metals, Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 7, pp. 1099-1119, 1983.
- [12] A. Krishnan, T. Thio, T. J. Kim, H. J. Lezec, T. W. Ebbesen, P. A. Wolff, J. Pendry, L. Martin-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, “Evanescence coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission,” *Opt. Commun.*, vol. 200, pp. 1-7, 2001.
- [13] F. J. Garcia-Vidal and L. Martin-Moreno, “Transmission and focusing of light in one-dimensional periodically nanostructured metals,” *Phys. Rev. B*, vol. 66, issue 15, pp. 155412-155422, 2002.
- [14] J. A. Porto, F. J. Garcia-Vidal, and J. B. Pendry, “Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 83, no. 14, pp. 2845-2848, 1999.

Color Filter Based on a Sub-wavelength Patterned Metal Grating

Hong-Shik Lee, Yeo-Taek Yoon, and Sang-Shin Lee[†]

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

[†]*E-mail: slee@kw.ac.kr*

Sang-Hoon Kim and Ki-Dong Lee

Devices and Materials Lab., LG Electronics Institute of Technology, 16 Woomyeon-Dong, Seocho-Gu, Seoul 137-724, Korea

(Received October 1, 2007, Revised manuscript November 1, 2007)

A color filter was demonstrated incorporating a patterned metal grating in a quartz substrate. The filter is created in a metal layer perforated with a symmetric two-dimensional array of circular holes, with the pitch smaller than the wavelength of the visible light. A finite-difference time-domain simulation was performed to analyze the device by investigating the effect of structural parameters like the grating height, the period, the hole size, and the refractive index of the hole-filling material on its performance. The device performance was especially optimized by controlling the refractive index of the material comprising the holes of the grating. And two different devices were fabricated by means of the e-beam direct writing with the following design parameters: the grating height of 50 nm, the two pitches of 340 nm for the red color and 260 nm for the green color. For the prepared device with the period of 340 nm, the center wavelength was 680 nm and the peak transmission 57%. And for the other device with the pitch of 260 nm, the center wavelength was 550 nm and the peak transmission was 50%. The filling of the hole with a material whose refractive index is matched to that of the substrate has led to an increase of ~15% in the transmission efficiency.

OCIS code : 050.0050, 330.1710, 160.3900, 240.6680.