

광파장 이하의 주기를 갖는 다결정 실리콘 격자 기반의 컬러필터

윤여택 · 이홍식 · 이상신[†]

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

김상훈 · 박주도 · 이기동

엘지전자기술원 소재재료연구소
☎ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2007년 12월 3일 받음, 2008년 1월 14일 수정본 받음)

본 논문에서는 광파장 이하의 주기를 갖는 다결정 실리콘 1차원 격자 기반의 컬러필터를 제안하고 구현하였다. 이 소자는 레이저 간섭 리소그래피 방식을 도입하여 제작되었으며, 기존의 전자빔 리소그래피 방식에 비해 훨씬 큰 유효 면적을 얻을 수 있었다. 특히, 실리콘 격자 층 상부에 산화막을 도입하여 마스크 층으로 활용함으로써 실리콘의 식각 깊이를 용이하게 조절할 수 있었고, 또한 필터의 컷오프 특성을 개선할 수 있었다. 설계된 소자의 파라미터는 실리콘 박막 두께 100 nm, 산화막 두께 200 nm, 격자 주기 450 nm였다. 제작된 청색 컬러필터의 중심파장은 470 nm이고 투과율은 약 40%였다. 그리고 유효 면적 3 mm × 3 mm 내에서 중심파장의 변화는 2 nm 이하, 상대적인 투과율 변화는 <10%였다. 그리고 빔의 입사각에 대한 상대적인 투과율 변화는 약 1.5%/degree였다.

주제어 : Diffraction gratings, Color filter, Silicon, Periodic structure, Lithography

I. 서 론

컬러필터는 가시광선 대역의 특정 색을 선택하는 핵심 요소로서 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) 이미지 센서, 액정 디스플레이 소자, 유·무기 발광 다이오드 소자 등에서 널리 사용되어 왔다.^[1-3] 지금까지 이러한 소자는 주로 도포된 안료 필름을 패터닝하여 구현되었다. 최근에 광파장 이하의 주기를 갖는 1차원 격자 구조를 전자빔 리소그래피 방식을 이용하여 구현된 단결정 실리콘 박막형 컬러필터가 보고되었다.^[4] 이러한 박막형 필터는 반도체 소자 제작에 광범위하게 활용되고 있는 CMOS 공정과의 우수한 호환성, 다른 기능 소자와의 용이한 집적, 비용 절감 등의 많은 장점을 지니고 있다. 그러나, 전자빔 리소그래피 공정에 따른 높은 제조비용으로 인하여 대면적 제작이 현실적으로 어렵다. 한편, 최근에 레이저 간섭 리소그래피(laser interference lithography: LIL) 방식을 이용하여 수 백 nm 이하의 주기를 갖는 격자 구조가 대면적으로 구현될 수 있음이 보고되었다.^[5,6] 또한, 실리콘 박막을 형성하기 위해서는 결정구조에 따라 증착 방법이 다르다. 즉, 단결정 실리콘의 경우에 물리증착(physical vapor deposition: PVD) 방식으로 박막을 증착하여 나노 패턴을 구현하는데, 균일한 박막 두께를 얻기가 어렵고 파티클(particle)로 인하여 양질의 막 형성이 어렵다. 반면에 다결정 실리콘은 고온의 화학기상증착(chemical vapor deposition: CVD) 방식을 통하여 박막을 형성하기 때문에 앞에서 언급된 문제점이 없다. 또한 적층형 박막 구조를 구현

하는 경우에도 다결정 실리콘이 단결정 실리콘보다 우수하여 대량생산 측면에서 유리하다.^[7]

본 논문에서는 광파장 이하의 주기를 갖는 1차원 격자구조 기반의 가시광선 대역 컬러필터를 구현하였다. 이 격자는 LIL 방법을 이용하여 다결정 실리콘 박막에 형성되었으며, 기존의 전자빔 리소그래피 방법에 비해 훨씬 넓은 유효면적을 얻을 수 있었다. 특히, 격자 층 상부에 마스크 층으로서 산화막을 도입하여 필터의 컷오프 특성을 개선하였을 뿐만 아니라 실리콘의 식각 깊이를 용이하게 조절할 수 있었다. 제안된 소자는 FDTD(finite-difference time-domain) 방법을 이용하여 설계 및 분석되었다. 특히, 입사 빔의 진행 방향이 컬러필터의 전달특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 제안된 소자의 동작원리 및 설계

본 논문에서는 실리콘 격자 기반의 청색 컬러필터 구현을 목표로 하는데, 제안된 소자의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 기판으로는 가시광선 대역에서 균일한 분산특성을 가지며 손실이 적은 쿼츠(quartz)를 사용하였다. 격자 층으로는 실리콘 박막을 도입하였으며, 실리콘 나노 격자 형성 시 마스크 층으로 사용할 산화막이 실리콘 박막 위에 형성되어 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 격자 주기는 Λ , 실리콘 선포는 W , 실리콘 박막 두께는 H_p , 산화막(SiO_2) 두께는 H_s 로 나타내어진다. 기판의 굴절률은 n_q , 실리콘의 굴절률은 n_p , 산화막의 굴절률은 n_s 이다.

그림 1에 도시되어 있는 제안된 필터를 구성하는 실리콘 격자 층은 격자 매질의 굴절률과 주위 매질의 굴절률 사이의

[†]E-mail: slee@kw.ac.kr

등가 굴절률을 가지며, 이 등가 굴절률은 하부 기판과 상부 공기 층의 굴절률에 비해 크다. 따라서 소자의 단면 구조는 3층 구조(기판 클래딩 - 격자층 코어 - 상부 커버 클래딩)를 갖는 평면도파로를 형성함을 알 수 있다.

한편, 이 소자에 광이 수직으로 입사할 때, 격자로 인한 회절 현상에 의하여 직진하는 0차 기본 모드 빔과 비스듬히 진행하는 고차 회절 모드 빔이 생성된다. 여기서 회절된 모드와 위에서 언급된 평면도파로의 도파 모드 간에 위상정합이 이루어지면 서로 간에 강한 결합이 생기는 도파모드공진(guided-mode resonance: GMR)이 유도된다.^[8,9]

전계가 격자 방향으로 존재하는 TE(transverse electric) 편광된 빔의 경우, 광파장 이하의 주기를 갖는 격자 구조에서 이러한 GMR 현상으로 인하여 특정 공진 파장을 중심으로 일정한 파장 대역에서는 광 투과가 향상되고 이외의 대역에서는 저하되는데, 이로 인하여 전체적으로 대역통과 필터 특성이 얻어진다고 알려져 있다.^[4]

제안된 소자를 설계하기 위하여 FDTD 방법 기반의 상용화된 툴인 OptiFDTD(캐나다 Optiwave)를 사용하였다. 설계 시 사용된 실리콘의 분산특성은 그림 2와 같이 파장에 따른 굴절률($n_p = n_r + jn_i$)의 변화로 정의 되었다.^[10] 한편, 쿼츠 기판의 굴절률은 1.5로 균일하다고 가정하였으며, 실리콘 박막의 공정 조건 등을 고려하여 산화막 두께는 200 nm로 고정하였다. 이 산화막을 실리콘 격자 형성 시 마스크 층으로 사용함으로써 기존의 포토레지스트 마스크 층을 사용할 때보다 실리콘의 식각 깊이를 용이하게 조절할 수 있으며 실리콘 내부의 거칠기를 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다. 결정된 청색 컬러필터의 설계 파라미터를 살펴보면, 격자 주기 $\Lambda = 450$ nm, 실리콘 선폭 $W = 150$ nm, 실리콘 박막 두께는

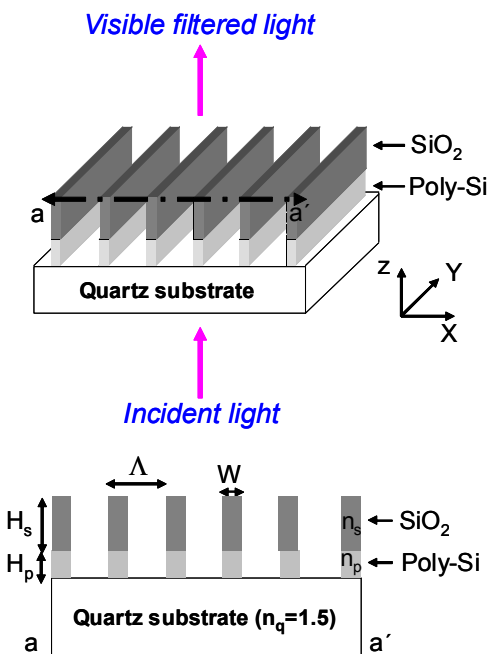


그림 1. 제안된 다결정 실리콘 컬러필터 구조.

$H_p = 100$ nm, 산화막 두께 $H_s = 200$ nm이다. 그림 3에는 설계된 소자의 계산된 응답 특성이 나타나 있는데, 격자 구조를 포함하지 않는 다층박막(기판 - 실리콘 - 산화막) 구조의 경우, 산화막이 있는 실리콘 격자 구조, 산화막이 없는 실리콘 격자 구조 등의 크게 세 가지 경우에 대한 계산된 투과 특성이다. 먼저 실리콘 격자 구조가 없는 경우에는 가시광선 대역에서 특별한 필터 특성이 얻어지지 않음을 알 수 있다. 한편, 실리콘 격자 구조가 도입된 경우에는 가시광선 대역에서 필터특성을 나타냄을 알 수 있다. 특히, 산화막을 도입함으로써 필터의 컷오프(cut-off) 특성이 개선됨을 알 수 있다. 결과적으로 설계된 소자의 중심 파장은 ~460 nm이고 투과율은 ~40%였다.

III. 소자 제작 및 특성 측정

제안된 소자의 제작공정은 그림 4에 도시되어 있다. 4" 쿼츠 기판 위에 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 방법을 이용하여 두께 100 nm의 다결정 실리콘 박막을 형성하고, 이 위에 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방식으로 두께 200 nm의 산화막을 형성하였다. 산화막과 포토레지스트와의 접착력을 높여주기 위해 10 nm 두께의 Cr 박막을 RF sputter로 증착 한 후, SPR-508A(Shipley

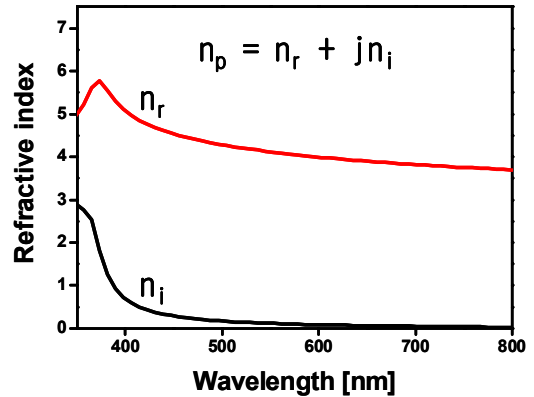


그림 2. 다결정 실리콘의 분산 특성.

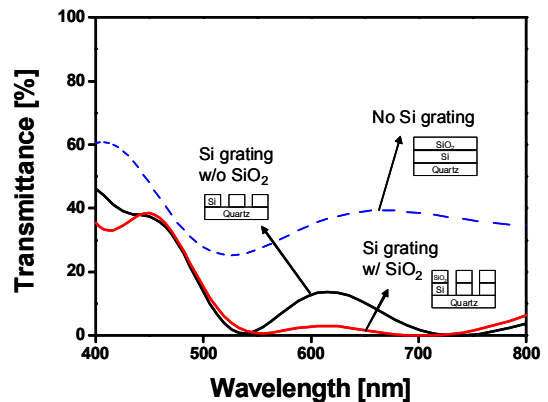


그림 3. 소자의 계산된 전달특성.

사) 포토레지스트를 스핀코팅 하였다. 그리고 LIL 공정을 도입하여 1차원 격자 패턴을 형성한 후 Cr층과 산화막을 RIE (reactive ion etching)을 이용하여 선택적으로 식각하였다. 포토레지스트와 Cr 박막을 제거한 후 산화막을 마스크 층으로 한 상태에서 ICP(inductively coupled plasma)를 이용하여 실리콘 박막을 적절하게 식각함으로써 소자를 완성하였다. 한편, 소자 제작을 위해 사용된 Lloyds-Mirror 방식의 LIL 공정 장치가 그림 5에 나타나 있다. 352 nm 파장 대역의 He-Cd 레이저 광원으로부터 직접 소자에 입사되는 빔과 반사형 거울을 거쳐 소자에 입사되는 빔 간의 간섭에 의하여 소자에 미세 격자 패턴이 형성된다. 그림 6에는 제작된 다결정 실리콘 격자 패턴의 SEM(scanning electron micrograph) 사진이 도시되어 있다. 측정된 격자 주기 $\Lambda = 446$ nm, 실리콘 선폭 $W = 156$ nm, 실리콘 박막 두께 $H_p = 96$ nm, 산화막 두께 $H_s = 198$ nm였다.

제작된 필터의 특성을 측정하기 위하여 스테이지에 장착시키고 난 후, 할로겐 램프(Ocean Optics, 모델 LS-1)의 출력광을 Glan-Thompson 편광기를 사용하여 TE 편광 빔을 얻은 후 소자에 입사시켰다. 출력 빔은 스펙트럼 분석기(Ocean

Optics, 모델 USB 4000-VIS-NIR)로 검출되었다. 얻어진 소자의 전달특성이 그림 7에 나타나 있는데, 예상대로 가시광선 대역통과 필터 특성을 보였으며, 특히 중심파장은 ~460 nm 이고 최대 투과효율은 ~40%였다. 또한, 백색광 입력에 대한 필터 출력을 카메라로 촬영한 청색 빔 이미지가 그림 7에 나타나 있다.

제작된 소자를 실제 컬러필터로 응용할 경우 광원으로부터 나오는 빔은 일반적으로 완전한 평행빔이 아니기 때문에 빔의 입사각이 소자의 전달특성에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 본 논문에서는 입력 빔이 소자에 수직이 아닌 일정한 각을 이루며 입사되는 경우에 대한 전달특성 변화를 고찰하였으며, 그림 8에는 먼저 입사각 θ 에 따른 필터의 투과율 변화가 도시되어 있다. 예상대로 입사 빔이 소자에 수직으로 입사할 경우($\theta = 0^\circ$) 최대 투과효율이 얻어지며, θ 가 증가함에 따라 투과율이 감소하였다. 즉, θ 가 0° 에서 16° 까지 증가할 때는 상대적인 투과율은 약 24% 감소함을 알 수 있다. 한편, 이론적으로 계산된 결과를 살펴보면 동일한 각도 변화에 대한 상대적인 투과율도 약 18% 감소하였다. 이로부터 빔의 입사각에 따른 상대적인 투과율 변화율은 측정값은 1.5%/Degree이고 계산 값은 1.0%/Degree였다.

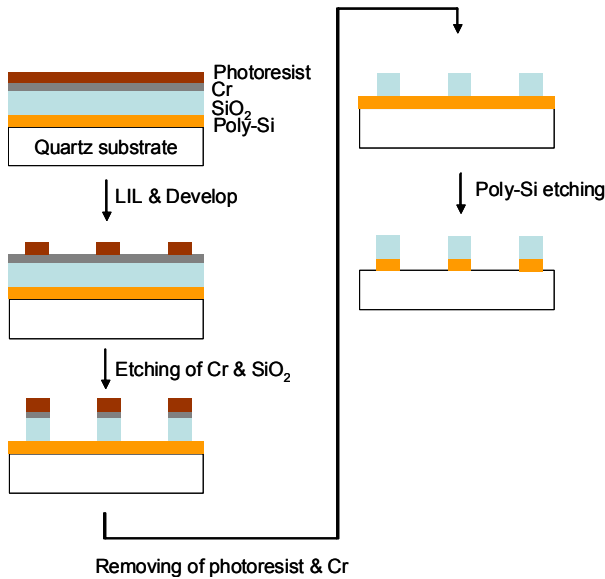


그림 4. 소자 제작공정.

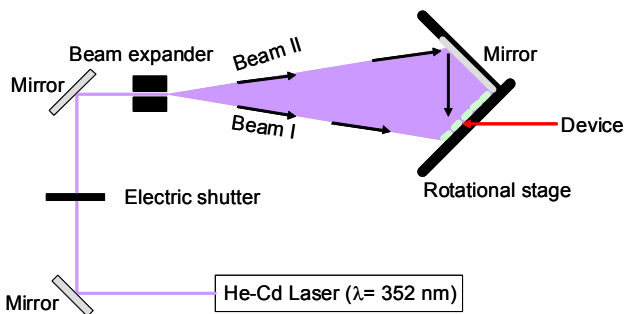


그림 5. LIL 공정 장치.

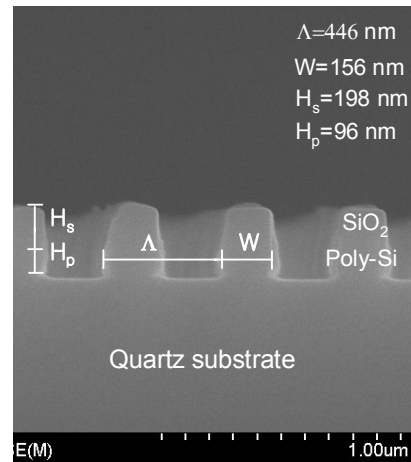


그림 6. 제작된 컬러필터의 SEM 사진.

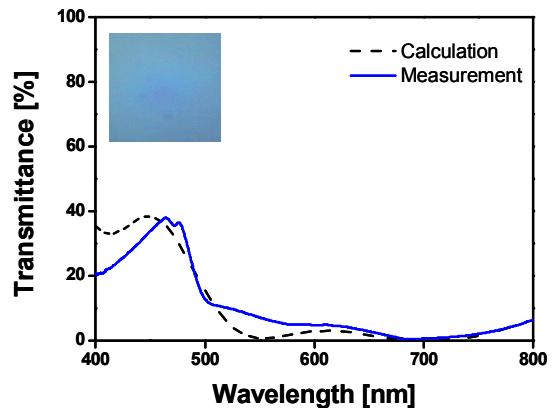


그림 7. 제작된 컬러필터의 전달특성.

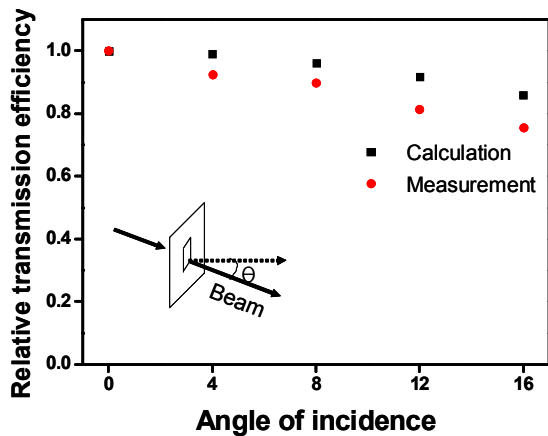


그림 8. 빔의 입사 각도에 따른 컬러필터의 전달특성 변화.

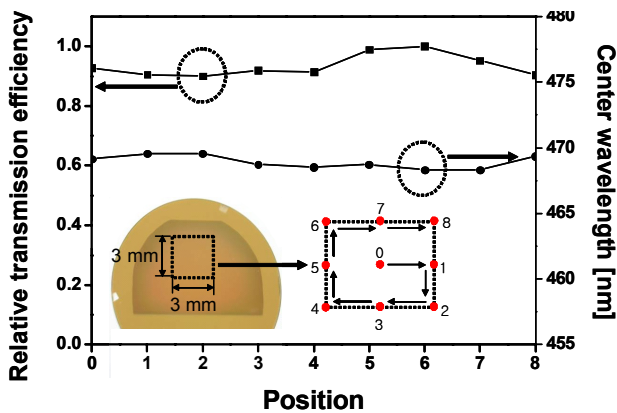


그림 9. 위치 변화에 따른 필터의 전달특성 변화.

다음으로 제작된 소자가 필터로서 적절하게 동작하는 유효 면적에 대하여 조사하였다. 그림 9는 3 mm × 3 mm 면적 내에서 측정 지점 9군데(P₀₋₈)에 대하여 위치에 따른 소자의 투과율과 중심파장 변화에 대해 측정 결과를 보여준다. 이 면적 내에서 상대적인 투과율 변화는 약 10%였으며, 중심파장은 2 nm 이하의 변화를 보였는데, 전반적으로 측정 영역 내에서는 유사한 전달특성을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이러한 투과효율 및 중심파장의 불균일은 위치에 따른 격자 파라미터의 불균일에 기인한다고 사료된다. 따라서 LIL 공정의 개선을 통하여 필터의 유효 면적을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.^[11] 마지막으로 본 논문에서 시도된 청색 이외의 적색 및 녹색용 필터는 격자의 주기 및 높이 등의 설계 파라미터를 조절하여 구현할 수 있다는 것을 이론적 계산을 통하여 확인하였다. 더 나아가 나노 임프린트 공정을 도입한다면 대량생산과 비용 절감 등을 비롯하여 나노 구조물을 갖는 컬러필터의 제작에 더욱더 용이할 것으로 기대된다.^[12]

IV. 결 론

본 논문에서는 LIL 공정을 이용하여 광과장 이하의 주기를 갖는 다결정 실리콘 1차원 격자 기반의 컬러필터를 제안

하고 구현하였다. 약 3 mm × 3 mm의 유효 면적을 갖는 청색 컬러필터를 얻었으며, 빔의 입사 각도에 대한 필터의 전달특성 변화도 관찰하였다.

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] Y. Kanamori, M. Shimono, and K. Hane, "Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrate," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 20, pp. 2126-2128, 2006.
- [5] Z. Yu, W. Wu, L. Chen, and S.Y. Chou, "Fabrication of large area 100 nm pitch grating by spatial frequency doubling and nanoimprint lithography for subwavelength optical applications," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 19, pp. 2816-2819, 2001.
- [6] C. J. M. van Rijn, W. Nijdam, S. Kuiper, G. J. Veldhuis, H. van Wolferen, and M. Elwenspoek, "Microsieves made with laser interference lithography for micro-filtration applications," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pp. 170-172, 1999.
- [7] K. Seshan, *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Technologies II* (Noyes Publications, New York, USA, 2002), pp. 11-43.
- [8] S. Tibuleac and R. Magnusson, "Reflection and transmission guided-mode resonance filters," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 7, pp. 1617-1626, 1997.
- [9] Y. Ding and R. Magnusson, "Doubly resonant single-layer bandpass optical filters," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 10, pp. 1135-1137, 2004.
- [10] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids III* (Academic Press, San Diego, USA, 1998), pp. 519-536.
- [11] S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, J. D. Park, S. H. Lee, and P. W. Yoon, "Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography," *Nanotechnol.*, vol. 16, pp. 1874-1877, 2005.

- [12] S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, S. H. Lee, J. D. Park, and P. W. Yoon, "Fabrication of subwavelength aluminum wire grating using nanoimprint lithography and reactive ion etching," *Microelectron. Eng.*, vol. 78-79, pp. 314-318, 2005.

Color Filter Based on a Sub-Wavelength Patterned Poly-Silicon Grating Fabricated using Laser Interference Lithography

Yeo-Taek Yoon, Hong-Shik Lee, 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, Joo-Do Park, and Ki-Dong Lee

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

(Received December 3, 2007, Revised manuscript January 14, 2008)

A color filter was proposed and demonstrated by incorporating a subwavelength patterned 1-dimensional grating in poly silicon. It was produced by employing the laser interference lithography method, providing much wider effective area compared to the conventional e-beam lithography. A SiO₂ layer was introduced on top of the silicon grating layer as a mask for the etching of the silicon, facilitating the etching of the silicon layer. It was theoretically found that the selectivity of the filter was also improved thanks to the oxide layer. The parameters for the designed device include the grating pitch of 450 nm, the grating height of 100 nm and the oxide-layer height of 200 nm. As for the fabricated filter, the spectral pass band corresponded to the blue color centered at 470 nm and the peak transmission was about 40%. Within the effective area of 3 × 3 mm², the variation in the relative transmission efficiency and in the center wavelength was less than 10% and 2 nm respectively. Finally, the influence of the angle of the incident beam upon the transfer characteristics of the device was investigated in terms of the rate of the relative transmission efficiency, which was found to be equivalent to 1.5%/degree.