Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 20, No. 8, p. 726, August 2007.

논 문 20-8-13

광자결정 제작을 위한 홀로그라피 공정 연구

A Study on the Holographic Process for Photonic Crystal Fabrication

여종빈[1], 윤상돈[2], 이현용[3,a]
(Jong-Bin Yeo[1], Sang-Don Yun[2], and Hyun-Yong Lee[3,a])

Abstract

Two dimensional photonic crystals (2D PCs) have been fabricated by a double exposure holographic method using a He-Cd laser with a wavelength of 442 nm. The arrays of the 2D PCs exhibit variable lattice structures from square to triangle according to a change of rotating angle (γ) for double exposure beams. In addition, the period and filling factor of PCs as well as the forms (dot or antidot) could be controlled by experimental conditions. A 1.18-μm-thick resist was spin-coated on Si substrate and the 1st holographic exposure was carried out at incident angle (θ) of 11°. Then the sample was rotated to $\gamma = 45° \sim 90°$ and the 2nd holographic process was performed at $\theta = 11°$. The variation of diffraction efficiency during the exposure process was observed using a He-Ne laser in real time. The images of 2D PCs prepared were analyzed by SEM and AFM. We believe that the double holographic method is a tool suitable to realize the 2D PCs with a periodic array of large area.

Key Words : 2D PCs, Photonic crystals, Holographic lithography, Periodic structure

1. 서 론

광의 특성을 이용하려는 노력은 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 특히, 고효율의 광소자 및 광집적화 소자를 실현하려는 연구들이 진행되고 있다[1]. 실리카 및 실리콘 기반의 평판형 광집적회로(planar lightwave circuit, PLC) 기술은 다양한 광소자들을 하나의 칩 상에 집적화할 수 있는 기본 공정기술로 인식되고 있다. PLC 회로를 구성하는 광도파로는 내부전반사를 이용하기 때문에 광로의 급격한 변화에 대해 그 손실이 크게 되어 소자의 소형화를 이루는 데 한계가 있으며, 극한적인 상황에서는 도파 기능을 상실하게 된다. 2차원 광자결정(photonic crystals, PCs) 배열을 갖는 기판 플랫폼(platform)이 집적화를 이룰 수 있는 새로운 대안으로 생각되고 있다[2]. 광자결정은 서로 다른 굴절률(또는 유전율)의 유전체를 공간 주기성(1, 2, 3차원)을 갖도록 제작하여 일정한 파장(주파수)영역에 대해 광의 전파가 금지되는 광자밴드갭(photonic bandgap, PBG)을 만들어 준 인위적 유전체 주기 결정체로 정의된다. 특히, 광자결정 내에 특정한 결함을 만들어 광자의 공진모드 또는 투과모드를 생성시킬 수 있기 때문에 이를 이용한 다양한 응용 연구가 진행되고 있다[3]. 광자결정이 도파로를 비롯한 다양한 광자소자의 기판으로 사용될 수 있는 이유는 빛의 도파·진행 원리가 내부전반사에 의한 메커니즘이 아닌 빛의 구속에 의하기 때문이다. PBG의 개념 또한 이러한 빛의 구속 원리로 이해될 수 있다.

광자결정 구조를 설계하는 것과 동시에 설계된 광자결정 구조를 제작 하는 기술이 중요하다. 일반적인 광자결정에서의 패턴은 광자의 파장 λ에 대해 $\lambda/4n$의 크기가 기초가 되기 때문에 1.55 μm의 광통신용 파장에 응용하기 위해서는 굴절률 1.46인 SiO_2의 경우 약 265 nm의 크기, 굴절률 3.53인 Si

1. 전남대학교 대학원 광공학협동과정
(광주시 북구 용봉동 300)
2. 전남대학교 대학원 신화학소재공학과
3. 전남대학교 응용화학공학부
a. Corresponding Author : hyleee@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2007. 6. 12
1차 심사 : 2007. 7. 3
심사완료 : 2007. 7. 11

의 경우 약 110 nm의 패턴 크기가 필요하다. 이러한 구조의 1차원 광자결정의 제작은 전자선증착, 스퍼터, CVD 등의 박막 기술을 이용하므로 1 nm 이하의 오차범위 내에서 제작이 가능하다. 하지만 2차원 광자결정의 경우 대면적에 주기적인 구조를 패터닝 하여야 하기 때문에 제작 방법에 대한 기술적 개발이 필요한 상황이다. 현재, 전자빔 리소그라피(electron beam lithography, EBL)나 집속이온빔 리소그라피(focused ion beam lithography, FIBL)등의 공정을 이용하여 특정 광자결정 패턴을 제작하려는 연구가 행해지고 있다. 이 방법들은 기판에 충격을 주거나 대면적 주기 구조를 형성하는데 공정 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 2차원 광자결정을 효율적으로 일괄 패터닝할 수 있는 대체 공정이 필요하며, 그 중 하나가 홀로그라피법이다.

이중 홀로그라피법(double holographic method)을 이용하므로 다양한 격자구조의 2차원 광자결정을 대면적으로 형성하는 것이 가능하며, 특히 광자결정의 주기 및 충진율(filling factor)을 제어할 수 있다[4]. 홀로그라피 공정은 광·전자의 정밀 패턴을 형성시키는데 크게 유용한 방법으로 대면적 빔을 전체적으로 조사하면서 한 번의 노광으로 전면적에 패턴을 형성하는 방법이므로 주기 구조를 빠르게 형성 시킬 수 있다는 장점이 있으며 한 번에 생성되는 각 패턴 조건을 균일하게 제어 할 수 있다는 장점이 있다.

또한 본 연구실의 구성은 다른 광소자의 정렬 조정이 필요없이 rotation stage 회전의 간단한 조작만으로 입사각을 조절할 수 있어서 다양한 주기의 패턴 제작이 용이하기 때문에 원하는 주기의 2차원 광자결정을 손쉽게 제작할 수 있다.

본 연구의 목적은 이중 홀로그라피법을 이용하여 2차원 광자결정 구조의 제작을 위한 최적의 조건을 확립하는데 있다. 레이저 광의 파워와 노출 시간을 변화시키면서 1차 노광을 행하여 직선형 회절패턴을 폴리머 레지스트에 전사하고 시료를 회전시키고 2차 노광을 행하여 2차원 광자결정을 레지스트에 전사한다. 이때, 실시간으로 회절효율을 측정하므로 최적의 노광조건을 선택할 수 있다[5].

2. 실 험

기판은 (100) p-Si 웨이퍼을 사용하였다. 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알콜, 초순수 순으로 세척한 후, PGMEA로 희석된 폴리머 레지스트(DMI-150)를 스핀-코팅방법으로 도포하였다. 코팅후 시료는 80 °C에서 60초 동안 진공, 건조시켜 주었다. 이때 알파스텝을 이용하여 측정된 레지스트의 두께는 약 1.18 μm로 평가되었다. 그림 1은 홀로그라피를 위한 노광장치 및 실시간 회절효율 측정시스템의 개략도이다.

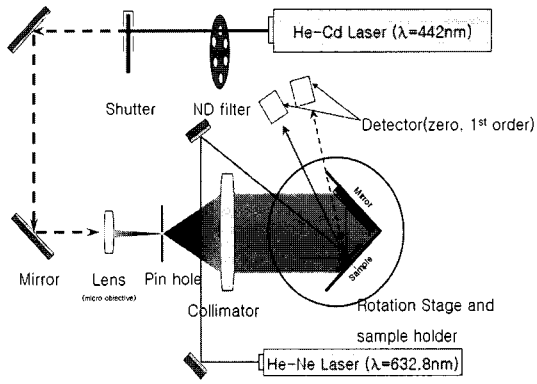


그림 1. 홀로그라피를 위한 노광장치와 실시간 회절효율 측정장치의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of the holographic exposure system and the real-time diffraction efficiency measuring system.

홀로그라피 노광장치는 광원으로는 442 nm 파장의 He-Cd 레이저를 사용하였고 셔터, 미러, 대물렌즈(N.A.=0.65), 핀홀(Φ=10 μm), 콜리메이터, 회전 시료 스테이지로 구성되어 있다. 입사 레이저 광파워는 30~100 mW/cm^{2}로 변화시켰다. 1차 노광(입사각 $\theta=11°$)을 통해 직선형 회절패턴을 레지스트에 전사하고 시료를 회전(회전각 $\gamma=45\sim90°$)시킨 후 2차 노광($\theta=11°$)을 통해 2차원 광자결정 패턴을 레지스트에 전사하였다. 실시간 회절효율은 632.8 nm의 He-Ne 레이저 광원을 사용하여 0-order와 1st-order의 회절빔 세기를 광파워미터를 이용하여 측정하므로 얻어진다. 여기서 회절효율 η는 0-order 빔세기 I_0에 대한 1st-order 빔세기 I_1의 백분율로 정의된다. 즉, $\eta=I_1/I_0 \cdot 100\%$. 노광된 시료의 현상은 현상액(TMAH 2.38 %)을 이용하여 최적의 시간 동안(약 15초로 평가) 이루어 졌다. 현상후의 패턴의 회절효율을 측정하였고 AFM 및 SEM을 이용하여 패턴을 관찰하였다.

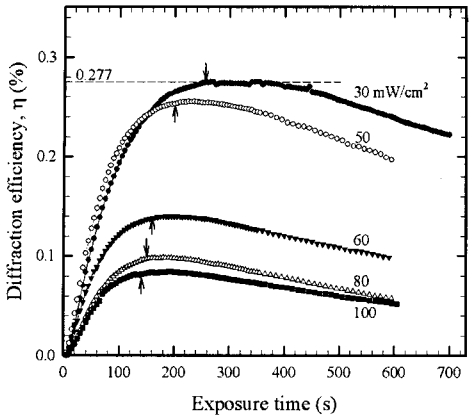


그림 2. 폴리머 레지스트의 레이저빔 파워 및 노광 시간에 따른 회절효율 변화(화살표=t_{max}).

Fig. 2. The kinetics of the diffraction efficiency as a function of exposure time and power for the polymer resist (arrows=t_{max}).

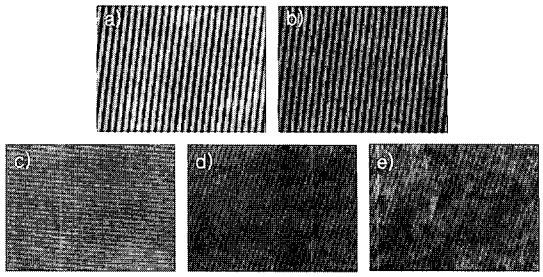


그림 3. 폴리머 레지스트의 홀로그라피에 의해 형성된 직선 격자의 광학현미경 이미지. 노광시간 = t_{max}; 현상시간 = 15초; 레이저 파워밀도(mW/cm^2) = (a)30, (b)50, (c)60, (d)80, (e)100.

Fig. 3. The optical microscope images of grating arrays formed in the polymer resist by holography method. Exposure time = t_{max}; development time = 15 s; power density of laser beam (mW/cm^2) = (a)30, (b)50, (c)60, (d)80, (e)100.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 홀로그라피 노출의 최적조건을 평가하기 위하여 실시간으로 측정한 레이저 빔 파워에 따른 회절효율 η의 변화이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 η는 노출시간 증가에 따라 상대적으로 빠른 속도로 증가하여 최대값(η_{max})을 보인 후, 서서히 감소하는 경향을 보인다. 특히, η_{max}와 여기에 도달하는 시간 t_{max}는 레이저 파워에 반비례함을 알 수 있다. 이것은 낮은 파워의 빔을 긴 시간동안 노출시키므로 레지스트 두께 전체에 상대적으로 균일한 광 흡수가 이루어지기 때문으로 생각된다. 실시간 회절효율 측정을 통하여 DMI-150 폴리머 레지스트의 최적의 홀로그라피 노출조건은 30 mW/cm^{2}의 레이저 파워밀도에 대해 약 250초의 노광시간으로 평가하였으며, 이 경우 얻어지는 η_{max}는 약 0.277 % 였다. 회절효율은 홀로그라피 노출에 따른 레지스트 굴절률의 공간주기성에 기인하는 결과로 DMI-150 광감성 고분자는 빛에 의해 폴리머 결합의 분해를 보이는 positive-형 레지스트로 광 노출 부분의 굴절률 감소를 예견할 수 있다.

그림 3은 입사각 θ는 11°로 고정하고 그림 2에서 얻어진 각 레이저빔 파워에 대해 t_{max}동안 홀로그라피 노출 후, 약 15초 동안 현상시켜 얻은 직선 격자의 광학현미경 사진이다. 그림 3(a)는 30 mW/cm^2 레이저 파워밀도, 250초 노출 시간에 대한 결과이다. (a) → (e) 순으로 노광하는 파워가 세어짐에 따라 패턴의 뚜렷함이 감소하는 경향을 보였다. 그림 3(b)의 현상된 레지스트로부터 측정된 회절효율은 약 92 %로 현상전(η_{max} ~0.25 %)보다 약 460배 증가하였다.

그림 3의 직선 격자의 주기(period Λ)는 약 1.1 ~1.2 μm로 평가되었다. 입사각도 θ에 대한 Λ 관계식 $\Lambda=\lambda/(2\sin\theta)$으로부터 계산된 주기가 1.158 μm이므로 계산 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 직선 패턴은 1차 노광의 결과이며, 본 논문에서 얻고자 하는 2차원 광자결정 패턴의 제작을 위한 기초 조건이다. 2차원 광자결정은 1차노광 후 시료를 일정한 각도(γ)로 회전시킨 후 2차 노광을 수행하여 얻어질 수 있다. 이때 1, 2차 노광 시의 θ및 현상조건 등에 의해 광자결정의 주기 및 충진률이 결정되며, γ에 의해 광자결정의 기본 격자(lattice) 모양이 결정된다. 그림 4는 직선 패턴얻는데 이용되어온 홀로그라피 방법을 응용하여 2차원 광자결정구조를 패터닝 할 수 있는 이중 홀로그라피 방법의 모식도를 그린 그림이다. 여기서 간섭하는 빛의 방향을 그대로 두고 샘플을 γ회전하면 같은 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 샘플을 회전시켜 두 번 노광하고 이를 현상시키므로 다양한 배열의 2차원 광자결정을 제작할 수 있다. 특히 노출량의

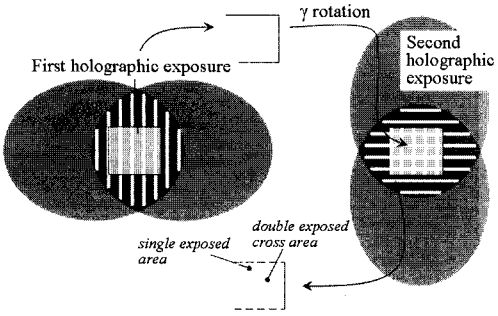
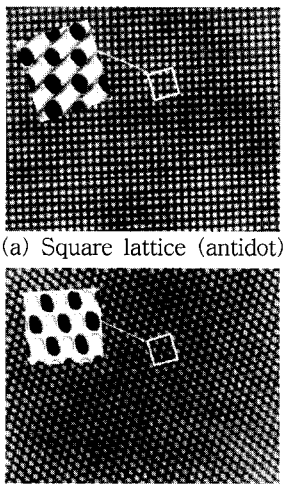


그림 4. 이중 홀로그라피 공정을 이용한 2차원 광자결정 제작의 모식도.

Fig. 4. Schematic diagram for the fabrication of 2D PCs by the double holographic method.



(a) Square lattice (antidot)

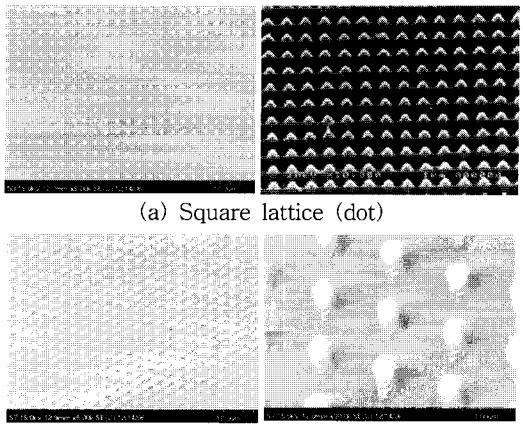
(b) Triangle lattice (antidot)

그림 5. 이중 홀로그라피 방법으로 제작된 antidot 형태의 2차원 광자결정 배열의 SEM 이미지; (a) 사각격자, (b) 삼각격자.

Fig. 5. SEM images of antidot-type 2D PC arrays fabricated by double holographic method ; (a) square lattice, (b) triangle lattice.

변화를 통해 현상 시에 그림 4의 이중노출 영역만을 제거한다면 광자결정은 antidot 형태가 되며, 단일노출영역과 이중노출영역 모두를 제거한다면 dot 형태가 될 수 있다.

그림 5는 그림 4의 이중 홀로그라피 방법으로 제작한 antidot 형태의 2차원 광자결정 배열의 SEM 이미지이다. 그림 5(a)는 $\theta=11°$, $\gamma=90°$로부터 얻어진 사각격자 결정이고 그림 5(b)는 $\theta=11°$, $\gamma=60°$



(a) Square lattice (dot)

(b) Triangle lattice (dot)

그림 6. dot 형태의 (a) 사각 및 (b) 삼각 격자구조의 2차원 광자결정 배열에 대한 SEM 이미지.

Fig. 6. SEM images of dot-type (a) square lattice and (b) triangle lattice 2D PC arrays.

에 대해 얻어진 삼각격자 결정이다. SEM 이미지 내부에 보이는 AFM 이미지로부터 antidot 및 기본 격자모양을 더욱 선명히 볼 수 있다.

그림 6은 노출 광량을 미세하게 제어하여 단일 및 이중노출 영역 모두를 현상시킨 경우 얻어진 dot 형태의 사각 및 삼각 기본격자 구조의 2차원 광자결정 배열이다. 특히 그림 6(b)의 경우, dot의 측면이 매끄럽지 못한 줄무늬의 모양을 갖는 것은 입사광과 기판으로부터의 반사광에 의해 생기는 정재파 효과 (standing wave effect) 때문으로 평가된다. 그림 5와 6에서 보여 지는 패턴의 주기는 그림 3의 것과 크게 다르지 않았다.

이상과 같이 홀로그라피의 입사각도, 회전각도, 노출 광량 및 현상조건을 조절하므로 원하는 주기, 충진률 및 dot 또는 antidot 형태의 기본 격자모양을 제작하는 것이 가능하다. 이러한 다양한 모양의 주기적 배열을 대면적으로 패터닝 할 수 있다는 점은 현실적인 광자결정을 제작하여 응용하는 데 있어서 큰 장점이 될 것이다. 특히, 이중 홀로그라피 방법은 레이저 빔을 대면적의 평행광으로 만들어 줄 수 있는 광학 기술 만 있다면 에칭 공정을 이용하여 특정 기판에 대면적의 2차원 광자결정 배열을 제작할 수 있다. 더욱이 이중, 삼중, 사중 홀로그라피 방법을 이용하여 공간적으로 주기성을 제어할 수 있다면 최근 주목을 받고 있는 준 광자결정(photonic quasicrystals)의 제작이 가능하며,

이는 비등방적 특성을 이용하므로 신개념의 소자의 개발을 가능하게 할 것이다.

현재 본 연구진은 이중 홀로그라피를 이용하여 폴리머 계열이 아닌 무기질인 비정질 칼코게나이드 레지스트의 Ag 광도핑[6,7]에 대한 연구를 수행중이다. 또한 특정 칼코게나이드 박막의 열 또는 광학적 팽창 기술을 이용하므로 2차원 렌즈 배열 제작에 대한 연구를 수행 중에 있다.

4. 결 론

이중 홀로그라피 방법(double holographic method)을 이용하여 입사각도, 회전각도 및 노출 광량 등을 달리하여 2차원 광자결정 패턴을 제작하였다. 특히, 패턴은 노광시간 등의 적절한 조절로 dot 및 antidot 형태로 제작하는 것이 가능하였다. 입사각도를 변화시키므로 결정의 주기 및 충진률을 제어할 수 있으며, 회전각도를 조절하므로 광자결정의 다양한 격자구조를 실현할 수 있다. 홀로그라피 노출 동안 레지스트에 영향을 주지 않는 상대적 장파장의 낮은 파워를 갖는 레이저를 이용하여 실시간 회절효율을 측정하므로 최적의 노출 조건으로 광자결정을 제작할 수 있다. 본 실험에서 두께 약 1.18 μm의 DMI-150 폴리머 레지스트에 대해 He-Cd 레이저(442 nm 파장)를 노출할 경우, 30 mW/cm^2의 레이저 파워밀도로 약 250초 동안 노출할 경우 회절효율이 최대값을 보였다. 입사각 θ가 11°인 경우 약 1.1~1.2 μm 주기(Λ)의 결정을 얻을 수 있으며 회전각 γ~60°, 90°에 대해 각각 삼각격자 및 사각격자를 얻었다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-521-D00273). 본 연구에 많은 도움을 준 교육인적자원부 BK21 기능성 나노 신화학소재 사업단에 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

[1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", Phys. Rev. Lett., Vol. 58, No. 20, p. 2059, 1987.

[2] C.-O. Cho, Y.-G. Roh, Y. S. Park, H. S. Jeon, B.-S. Lee, H.-W. Kim, and Y.-H. Choe, "Photonic crystal slab waveguides fabricated by the combination of holography and photolithography", Japanese Journal of Applied Physics., Vol. 43, No. 4A, p. 1384, 2004.

[3] H. Y. Lee, H. Makino, T. Yao, and A. Tanaka, "Si-based omnidirectional reflector and transmission filter optimized at a wavelength of 1.55 μm", Applied Physics Letters, Vol. 81, No. 24, p. 4502, 2002.

[4] J. P. Spallas, A. M. Hawryluk, and D. R. Kania, "Field emitter array mask patterning using laser interference lithography", J. Vac. Sci. Technol., Vol. B13, Iss. 5, p. 1973, 1995.

[5] S. H. Messaddeq, Siu M., and Messaddeq Y., "Relief grating induced by photo-expansion in Ga-Ge-S and Ga-Ge-As-S glasses", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 4, No. 2, p. 375, 2002.

[6] 이현용, 정홍배, "비정질 $Se_{75}Ge_{25}$ 박막의 이온침투현상 해석", 전기전자재료학회논문지, 7권, 5호, p. 389, 1994.

[7] 이현용, 김민수, 정홍배, "광노출에 따른 Ag 도핑 메카니즘 해석에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 8권, 4호, p. 472, 1995.