

레이저 홀로그래피 방법과 반응성 이온식각 방법을 이용한 InP/InGaAsP 광자 결정 구조 제작

이지면[†]

국립순천대학교 신소재응용공학부 재료·금속공학전공,
☎ 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지

이민수

국립상주대학교 신소재공학과
☎ 742-711 경북 상주시 가장동 386

이철욱·오수환·고현성·박상기·박문호

한국전자통신연구원 기반기술연구소 광통신소재연구부
☎ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

(2003년 9월 23일 받음, 2004년 7월 12일 수정본 받음)

레이저 홀로그래피 방법과 반응성 이온식각 방법(RIE: reactive ion etching)을 사용하여 2차원 광자결정을 제작하였다. 육변형(hexagonal) 및 사변형(square) 광자결정 격자는 첫 번째 레이저 노광 후 시편을 각각 60도 및 90도 회전하고 다시 두 번째 노광을 통하여 제작할 수 있었다. 또한 사변형 광자결정 격자의 나노컬럼(nanocolumn)의 크기와 주기는 레이저 입사각에 따라 각각 125~145 nm, 220~290 nm 로 미세한 조정이 가능하였다. 마지막으로 CH₄/H₂ 가스를 이용한 반응성 이온식각 방법을 통하여 aspect ratio가 1.5 이상인 InP/InGaAsP nanocolumn을 제작 할 수 있었다.

주제어 : photonic crystal, laser holography, RIE, InP, nanofabrication.

I. 서 론

최근 광통신 및 광소자 분야에서 여러 가지 새로운 특성으로 광을 재단(tailoring) 할 수 있는 광자결정(photonic crystals; 이하 PC)에 관한 연구가 활발히 진행 되고 있다.^[1] 광자결정은 관심있는 광자의 파장보다 작은 크기의 nanocolumn 혹은 nanohole의 형태인 광학적 원자(optical atom)가 굴절률의 차이가 있는 기저(matrix) 안에 존재하는 형태로 이루어진다. 이러한 광자 결정은 주로 제작하기 쉬운 2차원 구조에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있으며 또한 2차원 광자결정에 waveguide cladding layer를 성장시킴에 따라 3차원적으로 광의 제어가 가능하기 때문에,^[2] 광통신분야에 있어서 다른 광 부품과의 integration을 쉽게 할 수 있는 장점으로 특히 많은 주목을 받고 있다. 이러한 광자결정을 제작하기 위해서는 높은 해상도의 lithography 공정이 특히 중요한데, 일반적으로는 전자선 lithography 방법을 사용하지만, 이 방법은 대량 생산 및 효율적인 제작이 어려운 것이 단점이며, 또한 wafer 전체에 대한 pattern 형성이 필수적인 분야에서는,^[3] 전자선 lithography 방법은 적용하기 어려운 측면이 있다. 반면에 holography를 이용한 다중 노광 lithography

방법은^[3,4] 높은 분해능과 함께 넓은 영역의 패턴 형성이 가능하다는 장점이 있고^[5] 또한 mask가 필요하지 않다는 장점이 있으나, 이 방법을 이용한 성공적인 반도체 광자결정 제작에 관한 결과는 아직까지 보고되고 있지 않은 실정이다.

본 논문에서는 PC의 효율적인 제작을 위하여 laser holography를 이용한 nanolithography 방법과 반응성 이온식각(RIE) 방법을 이용하여 육변형 및 사변형 InP/InGaAsP 2차원 광자결정 구조의 제작에 관하여 연구하였다.

II. Laser holography 방법을 이용한 nano-lithography

그림 1은 실험에 사용된 laser holography system의 모식도로 분포궤환(DFB) 및 분포브래그 반사단(DBR) 레이저 다이오드의 제작에 필요한 1차원 grating 형성에 전형적으로 쓰이는 구성이다. PC 제작에 사용된 시편은 InP 혹은 InGaAsP quarter wafer를 사용하였으며, Si₃N₄ 층을 700 Å 증착 한 후 감광제를 코팅한 후 노광 하였다. 노광을 위하여 사용한 레이저는 Ar 이온 레이저($\lambda = 351.1$ nm)이며, 1 mW 출력에서 노광하였다. 이 때 레이저 빔의 입사각(θ)는 micrometer를 이용하여 조절 할 수 있으며, 입사각에 따르는 PC의 주기는 다음의 관계식에 의해 결정된다.

[†] E-mail: jimlee@sunchon.ac.kr

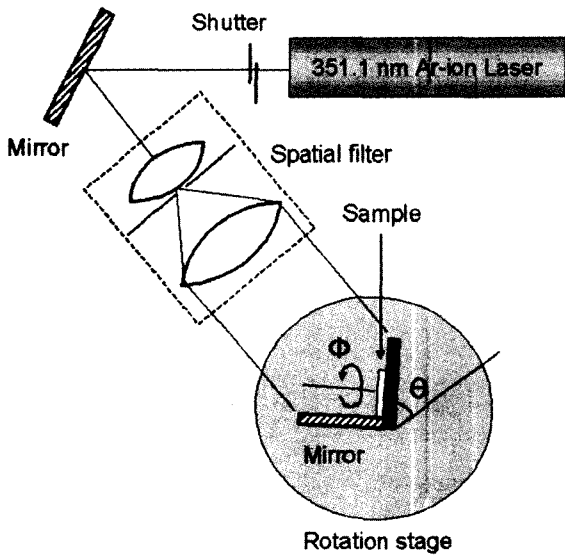


그림 1. 레이저 홀로그래픽 시스템의 모식도.

$$\Lambda = \frac{\lambda_L}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Λ 는 형성된 PC의 주기, λ_L 은 입사광의 파장(351.1 nm), θ 는 입사각이다. 반면 PC의 크기는 기본적으로 현상시간 (developing time)에 크게 좌우되는 것으로 알려지고 있다.^[6] 또한 시편의 회전각도(ϕ)는 lattice의 모양을 결정짓는 인자로, 첫 번째 노광 후 시편을 회전하여 다양한 lattice를 결정 지을 수 있다. 대표적으로 4-fold symmetry를 갖는 사변형 (square) 격자는 90도, 6-fold symmetry를 갖는 육변형 (hexagonal) 격자는 30도 혹은 60도 회전하여 제작할 수 있다. 이 때 첫 번째 노광에 대한 두 번째 노광 시간 비율 (second to first exposure time ratio)은 약 0.7 정도로 유지 하였다.

그림 2 (a)와 (b)는 제작된 포토레지스터의 SEM 사진으로 (a)는 $\phi = 90^\circ$ 인 사변형 격자 이고, (b)는 $\phi = 60^\circ$ 인 육변형 격자로서, 그림으로부터 크기와 주기가 균일한 dot이 잘 배열되었음을 알 수 있다. 그림 2(c)는 사변형 격자의 레이저 빔 입사각도에 따르는 크기와 주기에 대해서 나타내고 있다. 입사각을 37° 부터 52° 까지 증가함에 따라 PC의 주기는 $0.29 \mu\text{m}$ 부터 $0.22 \mu\text{m}$ 까지 점차 감소하고 있으며, 이러한 결과는 위 식에 의해 계산된 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

한편, 동일한 실험장비를 사용하여 1차원 grating ($\theta = 47^\circ$)을 제작 할 때의 전형적인 duty cycle이 약 43% 정도인 것과 비교할 때 본 연구에서 제작된 PC의 duty cycle은 약 35%로 약간 작게 나타났다. 그러므로 각각의 dot의 폭은 1차원 grating의 경우보다 작아지는데, 이것은 2회의 노광으로 인하여 감광막 내부에 광자의 flux가 증가하였기 때문이며 이러한 결과는 노광시간 비율을 0.7 이상으로 증가시키면, 현상

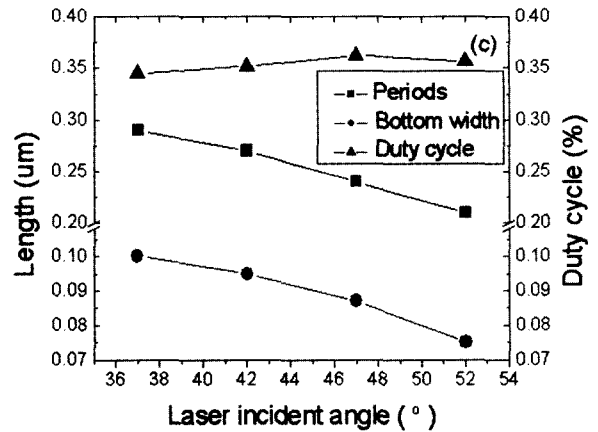
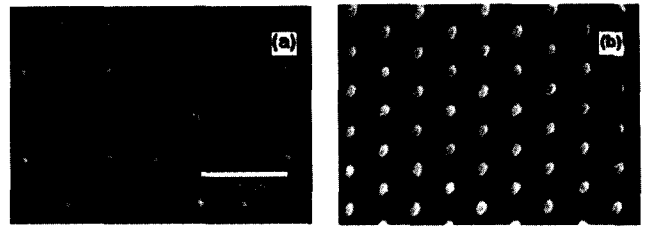


그림 2. $\theta = 47^\circ$ 에서 lithography 후 포토레지스터의 SEM 사진 (a) $\phi = 90^\circ$ 인 사변형 격자, (b) $\phi = 60^\circ$ 인 육변형 격자, (c) 레이저 입사각에 따른 PC의 주기, 크기, 및 duty cycle의 변화.

(developing)시 감광된 감광막이 모두 제거가 되는 것을 관찰한 것과 잘 일치하는 결과이다.

III. RIE 방법을 이용한 InP/InGaAsP 2차원 광자결정 구조 제작

나노 미터 크기를 갖는 PC의 특성상 세밀한 식각 control은 PC 제작의 필수적인 공정 이므로 상세한 검증과 고찰이 필요하다. 본 실험에서는 CH_4/H_2 플라즈마를 이용한 반응성 이온식각 방법 (reactive ion etching)을 사용하여 PC를 제작하였다. 그림 3은 제작된 PC의 SEM 사진으로 (a)는 15분, (b)는 30분 식각 후 표면을 나타낸 것이다. 그림 3(c)에서 알 수 있듯이 PC의 주기는 시간에 따라 변화가 없었으나, RIE 후 PC 하단의 지름이 lithography 후 PR의 폭보다 최대 50 nm 이하만큼 넓어졌다. 이러한 원인은 메탄 가스 플라즈마를 이용하는 식각의 전형적인 특성인 잔류 폴리머(C_xH_y)에 의한 옆면 식각이 억제되었기 때문인 것으로 생각된다.^[7] 그러나 초기에 기울어진 sidewall이 형성되었지만, 특정시간 이상, 즉 식각 공정이 steady-state 상태로 전환 된 시간 이상에서는 aspect-ratio가 선형적으로 증가함을 관찰 할 수 있었으며, 30분 식각 한 후 PC의 aspect-ratio는 1.5 이상으로 관찰 되었다.

그림 4(a)는 30분 동안 식각 된 후 형성된 nanocolumns의 레이저 빔 입사각에 따르는 주기 및 aspect ratio를 나타낸 그림이다. PC의 주기 및 크기는 예상 한 바와 같이 입사각이

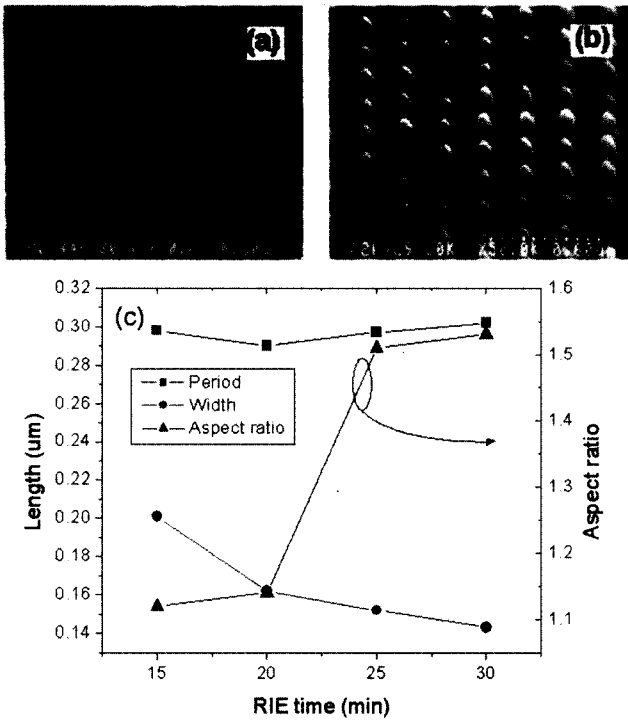


그림 3. $\theta = 47^\circ$ 그리고 $\phi = 90^\circ$ 에서 제작된 광자결정의 SEM 사진 (a) 15 분 RIE 식각 후, (b) 30 분 RIE 식각 후, (c) RIE 식각 시간에 따른 PC의 주기, 크기 및 aspect-ratio 변화.

증가 할수록 모두 감소하였다. 한편 aspect-ratio는 모두 1.5 이상이였지만, laser beam 입사각이 증가함에 따라 aspect-ratio는 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 나노 크기의 패턴을 건식 식각 할 때 전형적으로 발생하는 비 균일 식각특성인 loading 효과에^[8] 의한 것으로 생각된다. 즉 그림 4 (b)에서 관찰 한 것처럼 식각 될 면적이 좁을수록 (본 연구에서는 PC의 interspacing 혹은 주기) 표면에 수직인 방향으로의 식각율은 7.3 nm/min에서 8.5 nm/min 증가하여, 전형적인 패턴의존성 식각 특성인 loading 효과가 발생하였음을 확인 할 수 있었다. 이에 따라 동일한 시간 동안 식각 했을 경우 interspacing (혹은 주기)가 작은, 즉 높은 입사각으로 패터닝 된 PC의 경우 nanocrystal의 height는 더욱 증가하기 때문에 aspect-ratio가 증가하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

2차원 광자결정 제작을 위하여 레이저 홀로그래피 방법을 이용한 lithography 방법과 반응성 이온 식각 방법을 이용한 nanocolumn의 식각 특성에 관하여 연구하였다. 육변형 격자와 사변형 격자는 시편의 회전각에 따라 형성될 수 있음을 SEM으로 관찰 하였다. 레이저 빔 입사각이 증가함에 따라 주기와 지름이 증가하는 dot이 균일하게 형성됨을 관찰 할 수 있었으며, 또한 반응성 이온 식각 방법을 이용하여 광자 결정을 위한 nanocolumn을 제작한 결과 aspect-ratio가 1.5 이

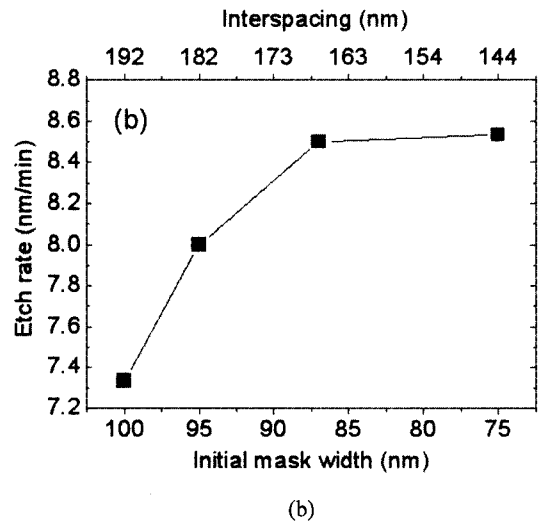
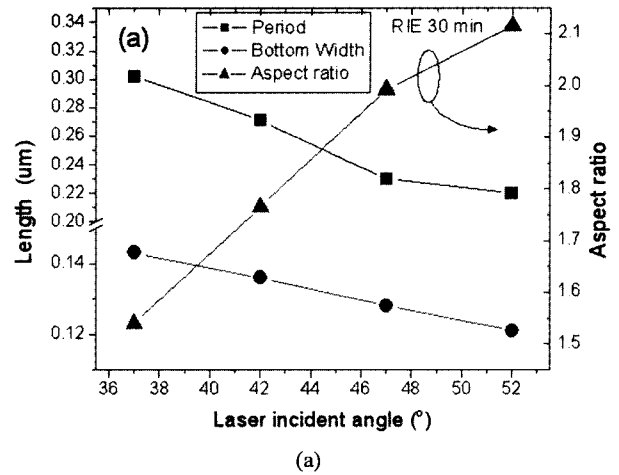


그림 4. (a) 30분 식각 후 형성된 nanocolumns의 레이저 빔 입사각에 따른 주기 및 aspect ratio, (b) 패턴간 거리에 따른 식각율의 변화.

상인 nanocolumn이 균일하게 형성됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] E. Yablonovitch, "Photonic band-gap structures," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 10, no. 2, pp. 283-299, 1993.
- [2] E. Chow, S. Y. Lin, S. G. Johnson, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, J. R. Wendt, G. A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou, and S. Alleman, "Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab," *Nature*, vol. 407, pp. 983-985, 2000.
- [3] T. Ohira, T. Segawa, K. Nagai, K. Utaka, and M. Nakao, "Large area InP submicron two-dimensional (2D) periodic structures fabricated by two-time laser holography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 2B, pp. 1085-1089, 2002.
- [4] S. C. Kitson, W. L. Barnes, and J. R. Sambles, "The

- fabrication of submicron hexagonal arrays using multiple-exposure optical interferometry," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 1662-1663, 1996.
- [5] T. F. Krauss, *Photonic Crystals and Light Localizaion in the 21st century*, C. M. Soukoulis, Ed., (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2001), pp. 131-132.
- [6] C. A. Mack, "Development of positive photoresists," *J. Electronchem. Soc.*, vol. 134, no. 1, pp. 148-152, 1987.
- [7] I. Adesida, K. Nummila, E. Andideh, J. Hughes, C. Caneau, B. Bhat, and R. Holmstrom, "Nanostructure fabrication in InP and related compounds," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 8, no. 6, pp. 1357-1360, 1990.
- [8] D. M. Manos and D. L. Flamm, in *Plasma etching, an introduction*, D. M. Manos and D. L. Flamm, Ed., (Academic press, San Diego, USA, 1989), pp. 138-144.

Nanofabrication of InP/InGaAsP 2D photonic crystals using maskless laser holographic method

Ji-Myon Lee[†]

*Department of Materials Science and Metallurgical Engineering,
Sunchon National University, Sunchon, Chonnam 540-742, Korea*

[†]E-mail: jimlee@sunchon.ac.kr

Min-Su Yi

*Department of Advanced Materials Engineering,
Sangju National University, Sangju, Kyungbuk 742-711, Korea*

Chul-Wook Lee, Su Hwan Oh, Hyunsung Ko, Sahnggi Park, and Moon Ho Park

Optical Communication Devices Dept. Electronics and Telecommunication Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

(Received September 23, 2003, Revised manuscript July 12, 2004)

Two-dimensionally arrayed nanocolumn lattices were fabricated by using double-exposure laser holographic method. The hexagonal lattice was formed by rotating the sample with 60 degree while the square lattice by 90 degree before the second laser-exposure. The size and period of nanocolumns could be controlled accurately from 125 to 145 nm in diameter and 220 to 290 nm in period for square lattice by changing the incident angle of laser beam. The reactive ion etching for a typical time of 30 min using CH₄/H₂ plasma enhanced the aspect-ratio by more than 1.5 with a slight increase of the bottom width of columns.

OCIS Codes : 090.4220, 110.3960, 130.3130, 130, 5990, 310.3840.