

나노 임프린트 공정에 의한 광자결정 도파로 제조공정

정은택* (부산대학교 나노과학과), 김창석(부산대학교 나노기술학과),
정명영 (부산대학교 나노기술학과)

Nano imprinting lithography fabrication for photonic crystal waveguides

Une Teak Jung(Nano Science. Dept. PNU), Chang Soek Kim (Nano Engineering Dept. PNU)
Myung Yung Jeong(Nano Engineering Dept. PNU)

ABSTRACT

Photonic crystals, periodic structure with a high refractive index contrast modulation, have recently become very interesting platform for manipulation of light. The existence of a photonic bandgap, a frequency range in which propagation of light is prevented in all direction, makes photonic crystal very useful in application where spatial localization of light is required for waveguide, beam splitter, and cavity. But fabrication of 3 dimensional photonic crystal is still difficult process. a concept that has recently attracted a lot of attention is a planar photonic crystal based on a dielectric membrane, suspended in the air, and perforated with 2 dimensional lattice of hole. We show that the polymer slabs suspended in air with triangular lattice of air hole can exhibit the in-plane photonic bandgap for TE-like modes. The fabrication of Si master with pillar structure using hot embossing process was investigated for 2 dimensional low-index-contrast photonic crystal waveguide

Key Words : Two dimensional photonic crystals(2 차원 광자결정), Nano Imprinting Lithography(나노임프린팅 리소그라피), Polymer waveguide(고분자 도파로), Low-index-contrast Photonic crystal(저대비 유전율 광자결정)

1. 서론

기존의 PIC는 TIR(Total Internal Reflection)을 이용한 광섬유와 광도파로(Optical waveguide)등은 높은 Bending loss와 접속 소자끼리의 Connection 면적의 한계로 집적화에 근원적인 한계를 가지고 있다. 광자결정(Photonic crystals)은 파장 정도의 크기대 단위의 Waveguide와 Low bending loss가 가능해 높은 전송속도와 고집적화를 구현하게 하는 구조체로 최근 각광받고 있다. 유전율(Dielectric index)이 일정한 주기를 갖도록 배열된 광자결정 내에서는 특정한 파장 영역대에서 빛의 진행이 불가능한 PBG(Photonic BandGap)의 성질을 가지게 된다.^{1,2} 이러한 PBG의 성질을 이용하면 광자결정 내에서 빛의 흐름을 제어할 수 있는데, PBG에 Line defect를 만듦으로써 특정 주파수 영역대나 특정 Mode만이 통과하도록 만들어 Bending loss 없는 광도파로를 구현해 낼 수 있다.^{1,2} 이러한 Line defect의 Size와 모양을 조절해서 Defect mode의 파장 영역대를 적절히 조절할 수 있는데, 이러한 성질은 Micro cavity

혹은 Waveguide로의 응용 가능성에 중요한 역할을 한다.^{2,3,7}

High-index-contrast를 가진 3차원 광자결정 구조체의 경우 Complete bandgap이 형성되는 장점이 있는 반면에 반도체 공정을 이용한 제조 방식으로 구현하기에는 구조 자체에 의한 많은 제작상의 어려움이 따른다. 2차원 Low-index-contrast 광자결정은 High-index-contrast를 가진 광자결정과 비교해서 PBG의 폭은 좁지만 낮은 굴절률차로 인한 Low-propagation-loss가 가능하고 기존의 TIR을 이용한 소자와의 Connection loss가 적은 장점이 있다.^{5,9} 또한 Polymer의 특성을 이용하면 복잡한 반도체 공정을 이용하지 않고서도 낮은 원가에 대량 생산할 수 있다.¹¹ Polymer를 재료로 광학 소자를 성형하는 기술 중에 고집적과 대량 생산에 용이한 기술로는 NIL(Nano Imprint Lithography)이 많이 연구되고 있는데 5nm 영역까지 선폭이 가능하고 생성시간이 수분 이내로 빨라서 대량 생산에 용이하다.

따라서 본 연구에서는 Polymer(PMMA)로 구성된 Air-bridged type의 Low-index-contrast (~1.59:1)를

가진 Triangular air-hole 2 차원 Slab 구조에서도 TE-like mode 에서 PBG 가 존재함을 확인하고, NIL 기술을 이용하여 2 차원 광자결정 패턴 생성에 적합한 스탬프 제작과 PMMA 로 2 차원 광자결정 도파로를 제조하는 공정을 최적화하는 연구를 수행하였다.

2.2 차원 폴리머 광자결정 도파로

Linear, Isotropic dielectric medium 을 진행하는 전자기파는 Maxwell equation 을 만족한다. 따라서

$$\nabla \times E = i(\omega/c)H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = -i(\omega/c)\epsilon(r)E \quad (2)$$

의 식을 만족하고 (1), (2)식을 연결하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H \quad (3)$$

의 식을 만족한다.

광자결정처럼 유전 상수(Dielectric index)가 적절한 간격으로 배열된 구조체에 전자기파가 진행하게 되면 Bloch equation (4)식을 만족해야 하는데 이를 (3)식에 대입하여 Plane-wave expansion methods 를 이용하여 계산하면 특정 파장대 영역에서 전자기파가 통과할 수 없는 PBG 가 존재함을 알 수 있다.¹

$$H = e^{i(k \cdot x - \omega t)} H_k(x) \quad (4)$$

Index $n = 1.59$, Lattice constant $a = 775\text{nm}$, Slab 두께 $t = 1.2a(930\text{nm})$, Hole 반경 $r = 0.34a(263.7\text{nm})$ 의 값을 가지면 $1519\text{nm} \sim 1581\text{nm}$ 파장대 사이의 TE-like mode 에서 PBG 가 형성됨을 Fig.1 에서 보여주고 있다.

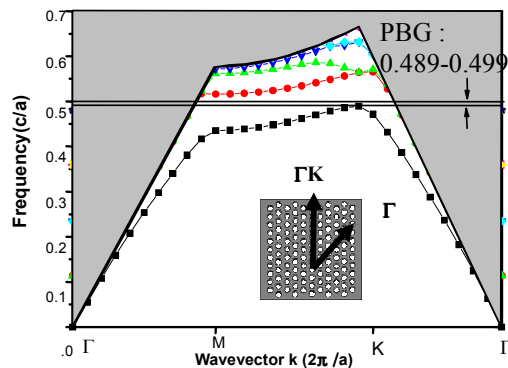


Fig. 1 Low-index-contrast 2-dimensional Photonic crystal PBG

여기에 다시 Single line defect 를 줌으로써

다양한 응용 가능성이 있는 Waveguide 를 형성한다. FDTD¹⁰ 시뮬레이션을 통해 얻은 Fig. 2 에서 회색 부분은 Light line 위쪽으로 이 영역에서는 Free space mode 와 Coupling 이 되므로 Leaky mode 가 형성된다. Single waveguide width 를 넓게 하면 PBG 영역이 넓어지지만 Light line 아래의 Guided mode width 가 좁아지므로 Group velocity 가 아주 작아져서 기존의 소자와 외부 Coupling 에 어려움이 따른다. 따라서 Waveguide width 를 $d = 0.9w$ 로 줄임으로써 이러한 문제를 해결하였다.

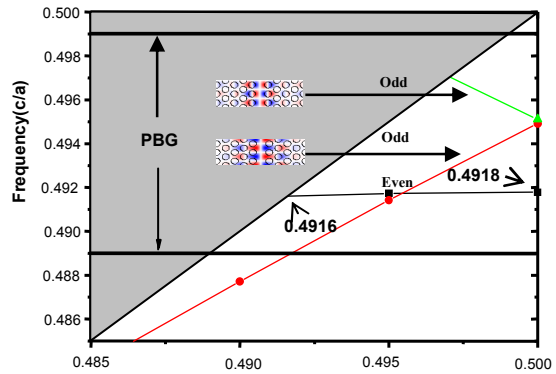


Fig. 2 Photonic band of defect modes

3. NIL 공정에 의한 광도파로 제작

앞서 설명한 2 차원 Polymer waveguide 를 NIL 공정을 통해서 제작하기 위해서는 최종적으로 Fig. 3 처럼 Triangular pillar 형태를 가지고 Lattice constant $a = 775\text{nm}$, Height = $1.2a(930\text{nm})$, Hole radius = $0.34a(263.5\text{nm})$, Waveguide width $d = 0.9w$ (1207nm)의 값을 가진 마스터 스탬프(Master stamp)를 먼저 제작하여야 한다.

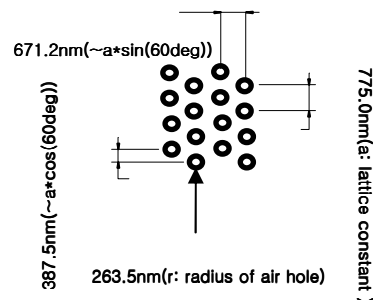


Fig. 3 Master stamp for triangular air hole type polymer waveguide

Fig. 4 에서 나타냈듯이 먼저 원형 마스터 스탬프를 제작하기 위해서 Si substrate 위에 Resist 층을 입히고 그 위에 E-beam lithography 로 Cross 패턴을 형성시켰다. 이렇게 생성된 패턴을 Develop/Etching 하여

Low -aspect - ratio 를 가진 Original pillar 마스터를 얻었다. Fig. 4 의 과정을 통해서 얻어진 원형 마스터를 NIL 과정의 스탬프로 사용하게 된다.

NIL 공정에 사용되는 핫 엠보싱(Hot embossing) 기법은 기관상위에 코팅된 열가소성 수지의 박막층을 이용하는 것으로 마스터와 시료가 유리전도 온도까지 가열하여 접촉한 뒤에 압력을 가하여 패턴을 성형한다. 소성 변형이 생긴 뒤로는 유리전이 온도 이하로 냉각한 다음 마스터와 시료를 분리하여 RIE 공정에 의해서 실리콘 기관을 식각하게 된다.

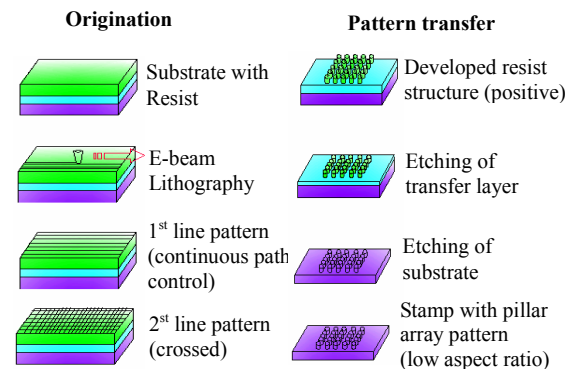


Fig. 4 Process scheme for the fabrication of original stamp

Fig. 4 의 과정을 통해서 제작한 Original pillar array 마스터는 Aspect ratio 를 좀 더 높인 Pillar array 를 얻기 위해서 Fig. 5 에서의 과정으로 한번 더 핫 엠보싱 과정과 RIE 과정을 거쳐서 Reverse 패턴의 스탬프를 얻을 수 있었다.

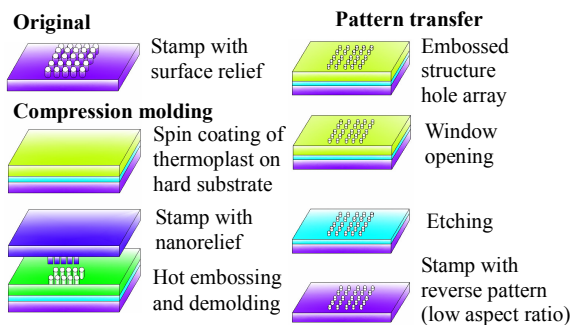


Fig. 5 Process scheme for the fabrication of stamp copies with reversed pattern

이러한 Reverse 패턴의 스탬프로 또다시 NIL 과정과 RIE 를 거치면 Pillar array 형태의 High aspect ratio 스탬프를 얻을 수 있게 된다. 그 과정을 Fig. 6 에 나타내었다. High aspect ratio 를 얻기 위해 Deep etching 을 하게 되면 Si etching 과정 중에 수직면의 패턴이 무너지는 경우가 생기는데,

각각의 스탬프 제작에서 Etching 과정을 적절히 조절하여 High aspect ratio 를 얻었다. 공정 조건은 table 1 에서 나타내었다.

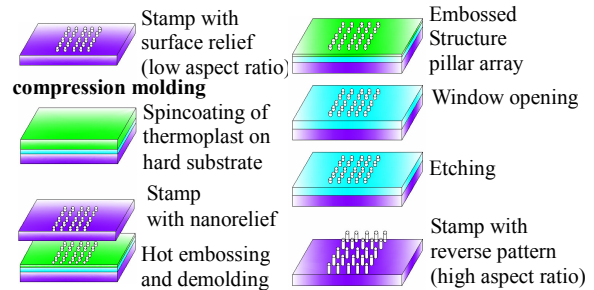


Fig. 6 Process scheme for the fabrication of high aspect ratio stamp copies

Table 1 Process parameter

공정 단계	공정 조건
Substrate	실리콘 스탬프 <100>방향, 두께 460um, Cr 20nm 증착
E-beam lithography exposure	PMMA 600kg/mol ethyl lactate 용해 (safer solvent), 60nm 두께
E-beam lithography development	Continuous path control mode
Development	MIBK/IPA 1:3, 45sec
Cr 에칭	RIE(BMP), Cl ₂ /CO ₂ gas, Standard value (max. power), 공정시간 60sec
Si 에칭	RIE(Oxford Plasmalab 100), O ₂ :CHF ₃ :SF ₆ , 5:40:2, power 200W, P=20mtor, 에칭비율 40nm/min
핫 엠보싱 resist	PMMA 25kg/mol ethyl lactate(safer solvent) 용해, 300nm 두께 (for moderate structure depth), 1000nm thick (for high structure depth)
엠보싱	엠보싱 온도 200C, 시간 15min (for pillar on stamp) to 60min (for holes), demolding at about 70C, 압력 50bar

Si etching 각 단계에서 각기 다른 혼합비의 etching gas 를 썼다. 이러한 과정을 통해서 High aspect ratio 구조물을 800nm 이상의 깊이까지 얻을 수 있었다.

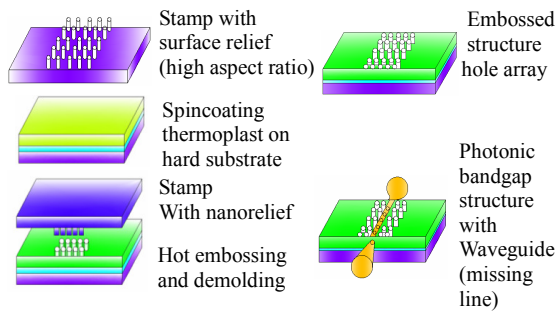


Fig. 7 Process for fabrication of photonic crystal by hot embossing

Fig. 7 에서 최종적으로 얻은 Pillar array 구조의 스탬프로 High-aspect ratio 광자결정 도파로를 핫 엠보싱 공정에 의해서 생성하였다. 다중 복사 과정을 통해 만들어낸 High aspect ratio 스탬프는 단 한 번의 복사를 통해 만들어낸 스탬프보다 공정이 복잡하지만 생성 시간을 단축 시키고 패턴 형성 시에 구조물의 손상 위험도를 줄일 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Low-index-contrast polymer 2 차원 광자결정은 Triangular air-bridged type 에서 TE-like mode PBG 가 생성됨이 확인되었고 이를 이용하여 Waveguide width 를 $0.9w$ 로 줄여 좁은 PBG 영역 내에서도 실질적으로 Waveguide 의 기능을 가질 수 있도록 만들었다. 다중 복사 과정에서 각각의 스탬프는 서로 다른 Aspect ratio 를 가지고 있으므로 다음 단계의 스탬프를 제작하기 위한 공정에서 각각 다른 Si etching 공정 조건으로 제작하였다. 각 공정마다 적절한 조건을 가해서 Fig. 8 에서 각각 800nm 이상의 높이를 가지는 양각 형태의 스탬프와 NIL 과정에서 그 스탬프를 사용한 PMMA waveguide 를 얻었다.

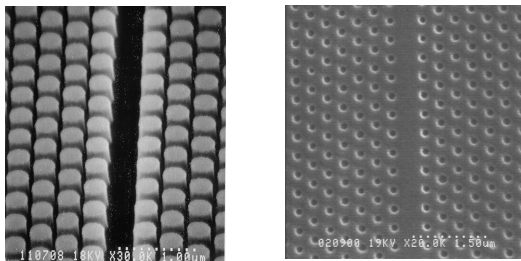


Fig. 8 Positive Si master stamp and pattern for low index photonic crystal waveguide

5. 결론

Low index (~ 1.59)를 가진 Triangular air-bridged type 광자결정 도파로를 설계하여 원형 마스터 스탬프를 제작하였다. NIL 공정을 이용하여 마스터 스탬프를 3 번 연속 복제과정을 수행하여 High-aspect-ratio(800nm 이상)를 가진 스탬프를 제작할 수 있었다. 또한 이를 이용해 광자결정 Waveguide 를 제작할 수 있었다. 본 연구를 통해 NIL 복제 기술이 광자결정 소자를 생산하는데 적합한 기술임이 확인되었다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-102390) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett, Vol. 58, pp. 2059, 1987.
2. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light sPrinceton University Press, Princeton, 1995
3. R. D. Meade, A. Devenyi, J. D. Joannopoulos, O. L. Alerhand, D. A. Smith, and K. Kash, J. Appl. Phys, Vol. 75, pp. 4753, 1994.
4. S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, Nature (London), Vol. 407, pp. 608, 2000.
5. G. Bottger, C. Liguda, M. Schmidt, and M. Eich, Appl. Phys. Lett, Vol. 81, pp. 2517, 2002.
6. C. Liguda, G. Bottger, A. Kuligk, R. Blum, M. Eich, H. Roth, J. Kunert, W. Morgenroth, H. Elsner, and H. G. Meyer, Appl. Phys. Lett, Vol. 78, pp. 2434, 2001.
7. J. Seekamp, S. Zankovych, A. H. Helfer, P. Maury, C. M. SotomayorTorres, G. Bottger, C. Liguda, M. Eich, B. Heidari, L. Montelius, and J. Ahopelto, Nanotechnology, Vol. 13, pp. 581, 2002.
8. C. M. Sotomayor Torres, S. Zankovych, J. Seekamp, A. P. Kam, C. C. Cedeno, T. Hoffmann, J. Ahopelto, F. Reuther, K. Pfeiffer, G. Bleidiessel, G. Gruetzner, M. V. Maximov, and B. Heidari, Mater. Sci. Eng., C, Vol. 23, pp. 23, 2003.
9. R. D. Meade, A. M. Rappe, K. D. Brommer, and J. D. Joannopoulos, Phys. Rev. B, Vol. 48, pp. 8434, 1993.
10. K. S. Kunz and R. J. Luebbers, Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics sCRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
11. S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 15, pp. 2897, 1997.