

# 초 광대역 옴니-광자 밴드 갭을 갖는 광자결정 미러

남기연, 조성준, 이현용  
전남대학교 응용화학공학부

## Photonic Crystal Mirror with Ultra Wide-Band omnidirectional-photonic bandgap

Gi-Yeon Nam, Sung-June Cho, Hyun-Yong Lee  
Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

### Abstract

옴니(omnidirectional)-PBG(photonic bandgap)의 크기는 쌍을 이루는 광자결정 재료의 고유 굴절률, 층진을 및 두께에 의해 결정 되는 것이 일반적이다. 그러나 광자결정체가 다중주기를 가지도록 제작하면 옴니-PBG의 크기를 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 Si/SiO<sub>2</sub>를 기본 구조로 하는 광대역 옴니-PBG용 광자결정 구조를 설계, 제작하고 그 특성을 평가 하였다. 각각 단일 주기  $\Lambda_1(426.9\text{nm})$  및  $\Lambda_2(306.9\text{nm})$ 를 갖는 8N-Si/SiO<sub>2</sub> 광자결정에 대해 TE/TM-편광 광 5° 및 45° 입사각에 대한 반사-스펙트라 측정결과는 설계값과 일치하였다. 특히 이중주기( $8N \cdot \Lambda_1 + 8N \cdot \Lambda_2$ )를 갖도록 제작된 Si/SiO<sub>2</sub> 광자결정은 입사각 5°의 TE-편광 광 반사-스펙트라 측정결과, 약 1050-2500nm의 광대역 파장범위에서 광자 밴드 갭을 보였다.

**Key Words** : 일차원광자결정, 옴니-미러, 초광대역 광자밴드갭

### 1. 서론

통상적으로 옴니-PBG의 크기는 쌍을 이루는 광자결정 구성 재료의 고유 굴절률 비에 의해 결정된다. 본 연구에서는 SiO<sub>2</sub>를 기본으로 한 1차원 광자결정체를 다중주기(multi-period)를 가지도록 설계, 제작, 평가하여 재료 고유 값에 의해 결정되는 것으로 생각되고 있는 옴니-PBG의 크기를 인위적으로 크게 증가시키는 것이 가능함을 제시할 것이다. 이는 원하는 옴니-PBG를 얻기 위해 광자결정의 구성 재료를 바꾸어야만 했던 단점을 제거할 수 있는 기술이다. 또한, 응용성 및 이 기술의 실용성 면을 고려하여 기존 단일모드 광섬유(SMF; single mode fiber)의 끝단에 이 구조를 실현할 수 있다. 여기에 제시된 내용은 본 저자의 아이디어를 기초로 한다.

### 2. 설계 및 실험

#### 2.1 광자결정체 구조 및 정의

광대역 옴니-PBG용 1차원 다중주기 광자결정(1D multi-PC)에 대한 구조를 그림 1(a)에 나타내었다. 각 기본 셀은 Si( $n_H=3.7$ )과 SiO<sub>2</sub> ( $n_L=1.5$ )의 교번쌍(alternating pair)으로 구성되고 N은 교번쌍의 수, M은 다중주기 광자결정의 주기 수를 나타낸다. 여기서의 다중주기는 일반 광자결정의 주기가  $\Lambda$ 로 정의되는 것과 달리 두 유전체( $n_H, n_L$ )의 교번 쌍의 광자결정이 서로 다른 유한개의 주기  $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4 \dots \Lambda_M$  (M-다중주기 광자결정)로 구성되어지는 경

우를 말한다. 예를 들어, 그림 1(a)처럼 기본 셀(basic cell)은 임의의 주기를 갖는 교번쌍 수가  $N=8$ 인 광자결정이고 서로 다른 주기를 갖는 동일한 N의 광자결정 셀들로 구성되어, 총 M-개의 광자결정 셀이 직렬로 연결되어진 형태이다. 그림1(b)와 (c)는 각각  $N=16$ 인 1차원 단일주기( $\Lambda$ ) 광자결정(1D single-PC)구조와  $N=8$ 의 기본 셀을 갖는 1차원 이중주기 광자결정(1D double-PC) 구조이다.

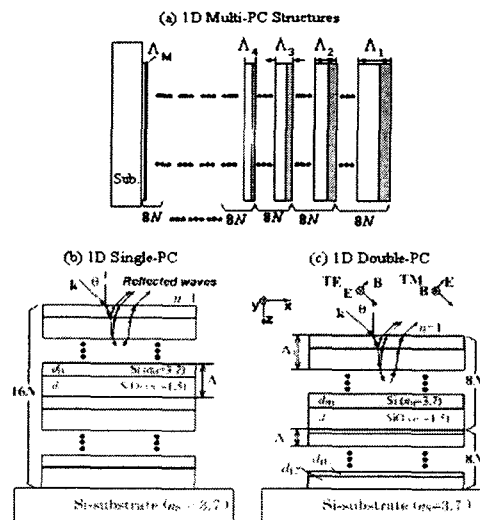


그림 1. 광대역 옴니-PBG용 (a) 1차원 다중주기 광자결정(1D multi-PC), (b)  $N=16$ 의 1차원 단일주기( $\Lambda$ ) 광자결정(1D single-PC) 및 (c)  $N=8$ 의 기본 셀을 갖는 1차원 이중주기 광자결정(1D double-PC) 구조의 개략도.

여기서의 유전체 교번쌍은 Si와 SiO<sub>2</sub>로 그들의 굴절률  $n_H=3.7$ ,  $n_L=1.5$ 로 고정하였고 Si기판을 사용하였다. 즉, 첨자  $M$ 이 전체 시스템을 구성하는 단위광자결정의 수로 기판 쪽에 근접할수록 큰 값의  $M$ 으로 정의하며,  $\Lambda_1 > \Lambda_2 > \Lambda_3 > \dots > \Lambda_M$ 의 조건을 갖는다.

## 2.2 광자밴드구조

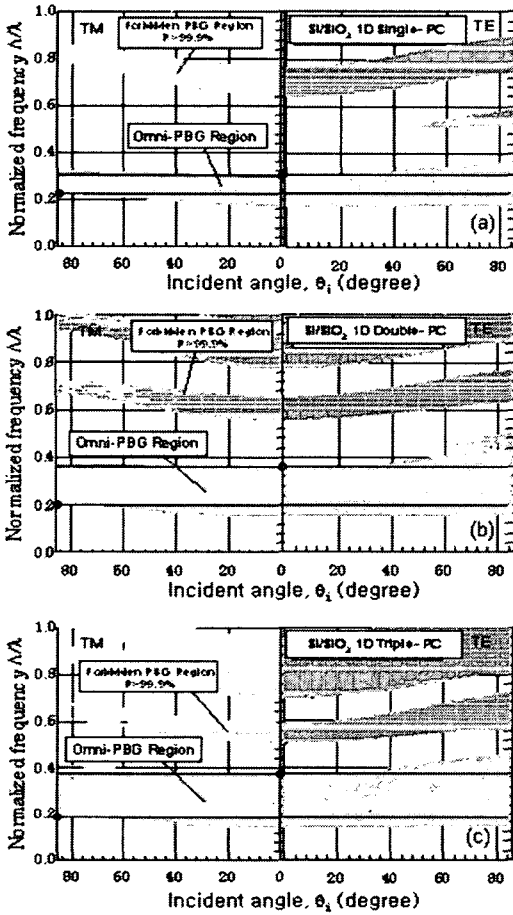


그림 2. Si과 SiO<sub>2</sub>의 교번쌍을 갖는 1차원 (a) $N=16$ 의 단일(single)주기, (b) $N=8$ 의 이중(double)주기 및 (c) $N=8$ 의 3중(triple)주기 광자결정에 대한 광자밴드구조.

그림 2는 Si과 SiO<sub>2</sub>의 교번쌍을 갖는 1차원 광자결정의 광자밴드구조로 (a)는  $N=16$ 의 단일(single)주기구조, (b)는  $N=8$ 의 이중(double)주기구조, (c) $N=8$ 의 3중(triple)주기구조의 광자결정에 대한 계산된 결과이다. 회색영역은 금지대로  $R > 99.9\%$ 인 영역이고 두 실선 사이의 주파수 영역이 옴니-PBG이다. 여기서 규격화 주기 (normalized period,  $\Lambda$ )는 각 주기의 산술 평균값으로 정의한다. 즉, 삼중주기에 대해  $\Lambda = (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3) / 3$ 이므로 규격화주파수는  $\Lambda / \lambda = (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3) / 3\lambda$ 이다. 그림 2로부터, “주어진 유전체 교번쌍의 광자결정에 대하여 그의 최대 옴니-PBG는 거의 변동이 없는 것처럼 보이지만, 광자결정 구조의 적절한 선택으로, 여기서는 다중주기 구조, 그 크기를 크게 증가시키는 것이 가능하다!”는 것을 알 수 있다. 각 경우의 옴니-PBG의 값은

표 1에 요약하였다.

표 1. 그림 2-34에 대한 옴니-PBG값

	Single PC ( $N=16$ )	Double PC ( $N=8$ )	Triple PC ( $N=8$ )
$\omega_H$	0.308	0.358	0.371
$\omega_L$	0.220	0.193	0.180
$\Delta\omega$	0.088	0.165	0.191
$\omega_0$	0.264	0.2755	0.2755

그림 2(a) 및 표 1에서 보는 바와 같이  $N=16$ 인 단일주기구조에 대해 계산된  $\omega_0=0.264$ 이다. 따라서, “ $N$ 이 증가할수록 옴니-PBG의  $\omega_0$ 는 증가함을 알 수 있으며, 어느 정도의  $N$ 값 이상( $>16$ )에 대하여 포화된다”

또한, 이중주기 및 삼중주기 광자결정에 대해 옴니-PBG는 증가하는 반면  $\omega_0$ 는 변동이 없으며, 다중주기 구조에 대하여 이것이 성립함을 계산을 통해 알 수 있다.

그림 3은 입사각 0°, 85°의 TM-편광광에 대한 단일주기( $\Lambda_1$ , 16 $N$ ), 이중주기( $\Lambda_1 + \Lambda_2$ , 16 $N$ ), 삼중주기( $\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3$ , 24 $N$ ) 광자결정의 계산된  $R$ -스펙트럼이다. 모든 기본 셀에 대해  $\eta$ 는 파장두께조건으로 일정하며, 구조 매개변수는 다음과 같다.

$$\Lambda_1 = d_{H1} + d_{L1} (474.3 \text{ nm} = 136.9 \text{ nm} + 337.4 \text{ nm})$$

$$\Lambda_2 = d_{H2} + d_{L2} (341.0 \text{ nm} = 98.5 \text{ nm} + 242.5 \text{ nm})$$

$$\Lambda_3 = d_{H3} + d_{L3} (294.5 \text{ nm} = 85.0 \text{ nm} + 209.5 \text{ nm})$$

그림 2에서처럼 (●), 광자밴드구조에서 광자결정의 옴니-PBG는 TM-편광광에 대해,  $\omega_H$ 는  $\theta_i=0^\circ$ 에서 결정되며,  $\omega_L$ 는  $\theta_i \sim 0^\circ$ 에서 결정된다. 따라서, 그림 3의 화살표의 영역이 각 광자결정에 대한 옴니-PBG에 대응한다고 할 수 있다.

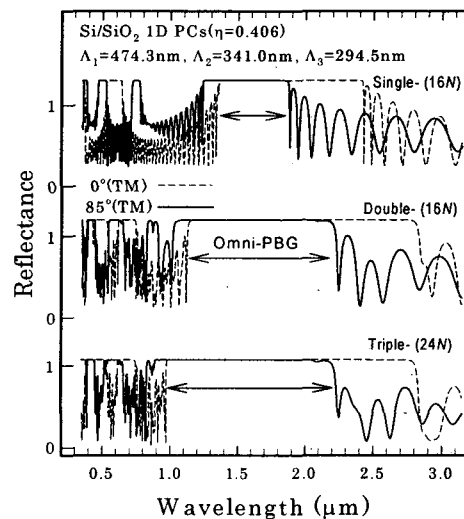


그림 3. 입사각 0°, 85°의 TM-편광광에 대한 단일주기( $\Lambda_1$ , 16 $N$ ), 이중주기( $\Lambda_1 + \Lambda_2$ , 16 $N$ ), 삼중주기( $\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3$ , 총 24 $N$ ) 광자결정의 계산된  $R$ -스펙트럼.

설계된 광대역 음니-PBG를 갖는 광자결정을 실현하기 위해 본 연구에서는 RF 스퍼터를 이용하여 주기  $\Lambda_1$ 과  $\Lambda_2$ 를 갖는 단일주기 광자결정을 각각 제작하였다. 제작시 두께는 기판 회전 속도, 기판-타겟간의 거리, 방전 가스 주입량 및 스퍼터 시간의 함수로 조절하였다. 초기 스퍼터 방전-챔버 내에 2종류의 Si기판을 넣고 8쌍의  $\Lambda_2$ 주기의 광자결정을 증착하고 그 중 1종류의 기판을 빼낸 후 다른 한 종류의 새로운 기판을 삽입하여 다시 8쌍의  $\Lambda_1$  주기의 광자결정을 완성하였다. 계속해서 남아있던 Si 기판위에는  $8N\cdot\Lambda_1$ ,  $8N\cdot\Lambda_2$ 가 순차적으로 증착된 형태의 이중주기 광자결정이 생성되게 된다. 초기에는 그림 3의 주기 조건을 갖는 광자결정의 제작을 목적으로 하였으나, 두께 측정 결과 약간의 오차가 있었다.

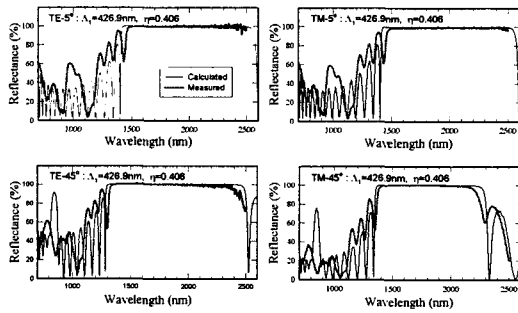


그림 4. 단일주기  $\Lambda_1(426.9 \text{ nm})$ 을 갖는  $8N\text{-Si/SiO}_2$  광자결정의 TE/TM-편광광  $5^\circ$  및  $45^\circ$  입사각에 대한 계산(가는 선) 및 측정(굵은 선)된 R-스펙트라.

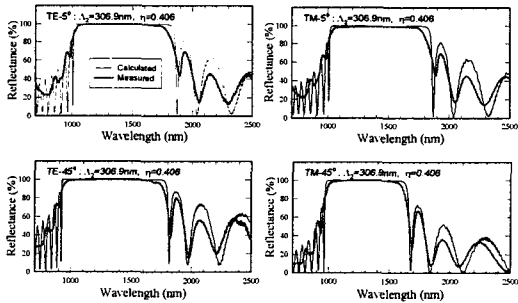


그림 5. 단일주기  $\Lambda_2(306.9 \text{ nm})$ 을 갖는  $8N\text{-Si/SiO}_2$  광자결정의 TE/TM-편광광  $5^\circ$  및  $45^\circ$  입사각에 대한 계산(가는 선) 및 측정(굵은 선)된 R-스펙트라.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4와 그림 5는 두 종류의 단일주기( $N=8$ ) 광자결정에 대한 R-스펙트라로 측정결과는 굵은 선으로 나타내어져 있다. 이때의 충진률(filling factor)  $\eta$ 는 0.406으로 일정하게 유지하였다. 그림 4의  $\Lambda_1$ 은 426.9nm이고 그림 5의  $\Lambda_2$ 는 306.9nm이었다.

$$\Lambda_1 = d_{H1} + d_{L1} = 123.3\text{nm} + 303.6\text{nm},$$

$$\Lambda_2 = d_{H2} + d_{L2} = 88.6\text{nm} + 218.3\text{nm}.$$

계산 값과 측정값은 거의 일치하였으며, 단지 1200nm 파장이하에서의 차이는 Si의 흡수 때문이다.

두 개의 개별 단일주기 광자결정(기판- $8N\cdot\Lambda_2$ - $8N\cdot\Lambda_1$ )이 직렬

연결된 형태의 이중주기 광자결정을 제작, 입사각  $5^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 TE-편광광에 대해 계산 및 측정된 R-스펙트라를 그림 6에 나타내었다.

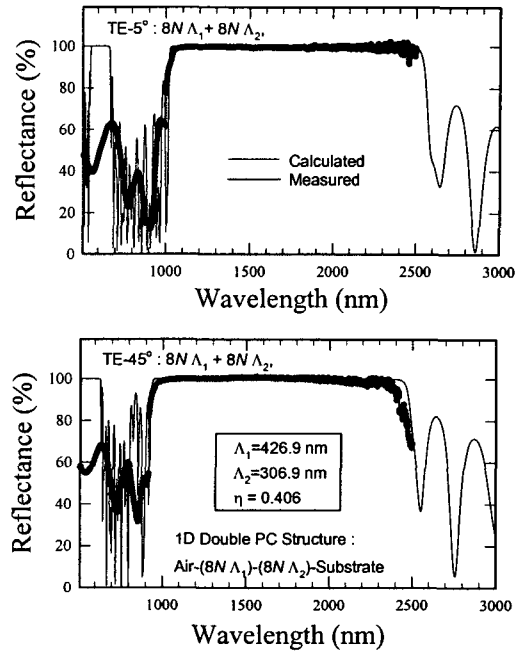


그림 6. 이중주기 ( $\Lambda_2=306.9\text{nm}$ ,  $\Lambda_1=426.9\text{nm}$ )을 갖는  $8N\text{-Si/SiO}_2$  광자결정의 TE-편광광  $5^\circ$ ,  $45^\circ$  입사각에 대한 계산(가는 선) 및 측정(굵은 선)된 R-스펙트라.

그림에서 보는 바와 같이 계산 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. TE- $5^\circ$  만을 비교할 때,  $8N\cdot\Lambda_1$ 광자결정(그림 4)의 경우 약 1450-2500nm 범위에서 금지대를 가지며,  $8N\cdot\Lambda_2$ 광자결정(그림 5)의 경우 약 1050-1870 nm에서 금지대를 갖는다. 또한, 그림 6에서 보는 바와 같이 이중주기 광자결정의 경우 TE- $5^\circ$ 에 대해 위의 두 경우를 모두 포함하는 약 1050-2500 nm의 금지대를 갖는다.

### 4. 결론

본 연구에서는 Si/SiO<sub>2</sub>를 기본 구조로 하는 광대역 음니-PBG용 광자결정 구조를 설계, 제작하고 그 특성을 평가하였다. 각각 단일 주기  $\Lambda_1(426.9\text{nm})$  및  $\Lambda_2(306.9\text{nm})$ 를 갖는  $8N\text{-Si/SiO}_2$  광자결정에 대해 TE/TM-편광광  $5^\circ$  및  $45^\circ$  입사각에 대한 반사-스펙트라 측정결과는 설계값과 일치하였다. 특히 이중주기( $8N\cdot\Lambda_1+8N\cdot\Lambda_2$ )를 갖도록 제작된 Si/SiO<sub>2</sub> 광자결정은 입사각  $5^\circ$ 의 TE-편광광 반사-스펙트라 측정결과, 약 1050-2500nm의 광대역 파장범위에서 광자 밴드 갭을 보였다. 즉, 다시 말해, 이중 단일광자결정의 금지대는 마치 직렬 저항연결에 의한 저항 합처럼 각각의 단일주기 광자결정의 금지대가 합해진 값을 가질 수 있다. 특히, 이러한 광자결정을 광섬유 끝단에 제작할 수 있기 때문에 광통신 분야에 여러 가지 응용성을 가질 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-03) 지원으로 수행되었음

## 참고 문헌

- [1] E.Yablonovitch, *Phy. Rev. Lett.* **58**, p.2059 1987.
- [2] J.D.Joannopoulos, R.Meade, and J.Winn, *Photonic Crystals (Princeton Univ. Press, Princeton, 1995)*.
- [3] J.D.Joannopoulos, P.Villeneuve, and S.Fan, *Nature (London)* **386**, p.143, 1997.
- [4] Y.Fink, J.N.Winn, S.Fan, C.Chen, J.Michel, J.D. Joannopoulos, and E.L.Thomas, *Science* **282**, p. 1679, 1998.
- [5] J.C.Knight, J.Broeng, T.A.Birks, and P.S.J. Russell, *Science* **282**, p.1476, 1998.
- [6] Y.Yi, P.Bermel, K.Wada, X.Duan, and J.D. Joannopoulos, and L.C. Kimerling, *Appl. Phys. Lett.* **81**, p.4112, 2002.
- [7] H.Y.Lee and T.Yao, *J. Appl. Phys.* **93**, p.819, 2003; *Virtual J. Nano. Sci. Technol.* **2**, 2003.
- [8] H.Y.Lee, H.Makino, T.Yao, and M.Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **81**, p.4502, 2002.
- [9] H.Y.Lee and T.Yao, *J. Kor. Phys. Soc.* **44**, p. 387, 2004.
- [10] H.Y.Lee and T.Yao, *J. Appl. Phys.* **97**, 1(2005)