

## 최대 광밴드갭을 위한 2차원 광결정 구조

성준호 · 오범환<sup>†</sup> · 이승걸 · 박세근 · 이일향

인하대학교 정보통신공학부

Ⓣ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2005년 5월 13일 받음, 2005년 6월 15일 수정본 받음)

광자결정의 밴드갭이 크면서도 모든 편광방향에 대해 동일하게 설계될 수 있다면, 이러한 광밴드갭은 다양한 소자의 응용에 있어 보다 유용해 질 수 있다. 현재까지는 원형의 공기구멍으로 이루어진 삼각격자 구조가 가장 큰 광밴드갭을 갖는 것으로 알려져 왔으나, 본 논문에서는 각종 구조적 변화에 의한 밴드갭의 변화경향을 분석하고 체계화함에 따라, 모든 편광방향에 대해 광밴드갭이 동일하면서 가장 크게 되는 새로운 격자구조를 제안하였다. 이 구조의 광밴드갭 비율( $\Delta\omega/\omega$ )은 기존의 삼각격자에 비해 약 30% 정도 증대된 것임을 확인하였다.

주제어 : 2-D Photonic crystals, Photonic band gap, Polarization, Isolation and connectivity.

### I. 서 론

Yablonovitch,<sup>[1]</sup> John<sup>[2]</sup> 등이 광자결정에 관한 선구적인 연구결과를 발표한 이후, 광자결정을 레이저<sup>[3,4]</sup>나 광변조기<sup>[5]</sup> 등의 다양한 광소자 제작에 응용하고자 하는 노력이 계속 경주되었다. 이는 광자결정이 전자기파의 파장과 구조사이의 간단한 비례관계를 만족한다는 학문적 매력을 갖고 있으면서도, 전자기파의 존재형태를 기존 도파로와는 전혀 다른 새로운 방식으로 제어한다는 특이성을 갖고 있기 때문이다. 광자결정의 밴드갭이 크다면 국소적 결합을 이용하는 소자 설계의 오차한계나 동작한계를 한층 개선하여 줄 것<sup>[6]</sup>이므로 소자설계와 응용의 효용성이 더욱 높아질 것이며, 광자결정 레이저의 공명 반치폭을 더 줄여주어 소자의 품격을 높여주게 된다.<sup>[7]</sup> 게다가, 모든 편광방향에 대해 밴드갭이 같다면 소자의 실제적인 구현에 큰 장점이 될 것이므로 편광의존성이 적은 절대-광밴드갭을 갖는 광자결정을 설계하려는 연구 노력이 계속되어 왔다.

그 대표적인 예로서, 다양한 격자구조(square, triangular,<sup>[8]</sup> honeycomb,<sup>[9]</sup> and kagome<sup>[10]</sup> lattices)에 대한 밴드갭을 계산하고 최대화하려는 노력뿐만 아니라, 격자의 형태인자(form factor)를 조절하거나, 각종 삼각, 사각, 육각격자 구조에 이종의 구조를 부가하여 공간 대칭성을 저하시켜 부분적으로나마 밴드갭을 확장해보고자 하는 노력도 있었다<sup>[11-18]</sup>. 이러한 다양한 연구노력에도 불구하고, 현재까지 알려져 있는 가장 큰 절대-광밴드갭을 갖는 광자결정은 원형의 공기구멍을 삼각격자구조로 배열한 것이며, 11.25의 고광학계수(ehigh = 11.25)에 대해 그 최대 광밴드갭 비율( $\Delta\omega/\omega$ )은 17.8% 정도였다.<sup>[15]</sup>

본 논문에서는 각 편광에 대하여 격자구조변화에 수반되는

밴드갭의 변화경향을 분석하여 체계적인 변화 양상을 파악하였고, 편광에 따라 밴드갭의 변화양상이 서로 차별화되므로 이를 적절히 상호 절충하는 구조를 제안하고 모든 편광방향에 대해 밴드갭이 동일하면서 광밴드갭이 가장 크게 되는 구조를 찾아내었다.

### II. 본 론

#### 1. 각 편광에 대한 광밴드갭의 변화경향

2차원 광자결정의 광밴드갭은 편광방향에 따라 특성이 바뀌는 것이 일반적이며 서로 독립적인 편광방향은 두 가지로 볼 수 있다. 2차원 광자결정 구조물의 일반적인 형태를 그림 1-(a)와 같이 표현한다면, 수직방향으로의(x-z평면에 대한) 절단면은 그림 1-(b)와 같이 표현할 수 있다. 이 때 전기장이 z-축과 평행한 편광모드는 E-편광모드가 되고, 자기장이 z-축과 평행한 편광모드는 H-편광모드가 된다. 2차원 광자결정의 광밴드갭 특성은 위 두 가지의 독립적인 편광방향에 대해 다르게 나타나며, 이는 잘 알려진 'the general rule of thumb'<sup>[19]</sup>을 따른다. 즉, E-편광 모드의 밴드갭은 주기적인 유전체가 일정 크기를 가지며 서로 고립된 구조에서 큰 반면, H-편광 모드의 밴드갭은 유전체가 서로 연결되어 있는 구조에서 크게 나타난다. 따라서, 편광에 상관없는 공통의 절대-광밴드갭이 존재하기 위해서는 유전체의 고립된 부분(그림 1-(a)의 spot)이 일정 크기 이상을 가지고, 연결된 부분(그림 1-(a)의 vein)의 두께가 가능한 좁아야 한다.

이의 확인을 위해, 상기의 두 가지 조건을 만족하며 절대-광밴드갭이 존재하는 구조로 잘 알려진 원형 공기구멍의 삼각격자 구조의 갭 지도를 계산하였다[그림 2-(a)]. 이 계산은 기본적인 평면파 전개 방법(plane-wave expansion method)<sup>[20]</sup>으로 561개의 평면파를 사용하여 진행되었으며, 그 계산

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

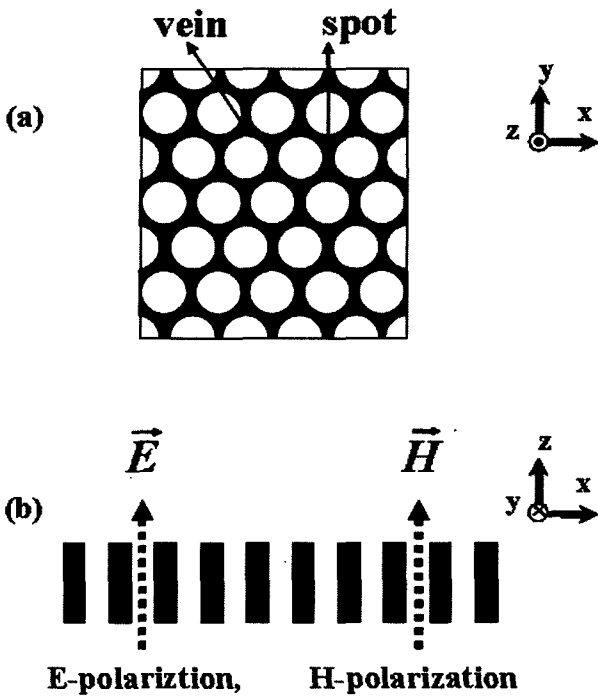


그림 1. (a) 2차원 광자결정의 평면 개략도, (b) 2차원 광자결정의 측면 개략도와 두 가지 독립적인 편광방향, E-편광과 H-편광.

상 오차는 약 1% 이내로 추정된다. 갭 지도는 원형 공기구멍의 크기를 증가시키면서 그에 따라 변하는 밴드갭의 위치를 규격화된 주파수 영역에 나타낸 것이다. 이 때 원형 공기구멍의 크기가 커질수록 전체면적에 대한 공기의 면적비율은 높아지며, 이러한 면적비율을 void fraction으로 정의하였다. 따라서 void fraction이 '0'인 경우는 전체 영역이 광학계수가 높은 물질(유전체; 그림 2-(a), (b), (c)의 모든 삽입그림 중 어두운 부분)로 채워져 있음을 나타내고, void fraction이 '1'인 경우는 전체 영역이 공기(그림 2-(a), (b), (c)의 모든 삽입그림 중 밝은 부분)로 이루어져 있음을 나타낸다. 또한, 'a'는 격자 상수를 나타내며, 모든 계산에 사용된 유전체의 광학계수는 11.25, 공기의 광학계수는 1이다. 원형 공기구멍의 삼각격자 구조에서, 공기구멍의 반지름이  $0.44a$  보다 작을 경우, 즉 void fraction이 0.6보다 작을 경우에는 그림 2-(a)의 첫 번째 또는 두 번째 삽입그림과 같이 유전체(삽입그림의 어두운 부분)의 연결성이 잘 유지되어 있다. 따라서 H-편광 모드의 광밴드갭이 비교적 크게 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 이 경우, 'vein'이 'spot'에 비해 상대적으로 강조되어 유전체의 고립성이 미약하기 때문에 E-편광 모드의 광밴드갭은 거의 존재하지 않게 된다. 반면에 공기구멍의 반지름이  $0.45a$  정도이거나 그보다 클 때, 즉 void fraction이 0.6과 0.9 사이일 경우에는, 'vein'의 두께가 비교적 좁아져 그림 2-(a)의 세 번째 삽입그림과 같이 유전체의 연결성과 고립성은 조화를 이루게 되며, 두 편광 모드의 광밴드갭이 서

로 겹치는 절대-광밴드갭 영역이 존재하게 된다. 이러한 결과들은 편광방향에 대한 광밴드갭의 변화 경향이 'the general rule of thumb'를 잘 만족하고 있다는 것을 의미한다. 이 구조에서의 최대의 공통 광밴드갭 비율( $\Delta\omega/\omega c$ )은 void fraction이 0.85일 때의 17.86% 정도이다[그림 2-(a)].

원형 공기구멍의 삼각격자 구조[그림 2-(a)]에서 'spot'부분의 크기만을 강조한 전형적인 구조는 원형 유전기둥의 벌집격자 구조와 비슷한 구조가 된다[그림 2-(b)의 삽입그림]. 이는 그림 2-(b)의 삽입그림과 같이 원형 유전기둥이 서로 떨어져 있어 고립성이 보다 강조된 구조라 할 수 있으며, 가

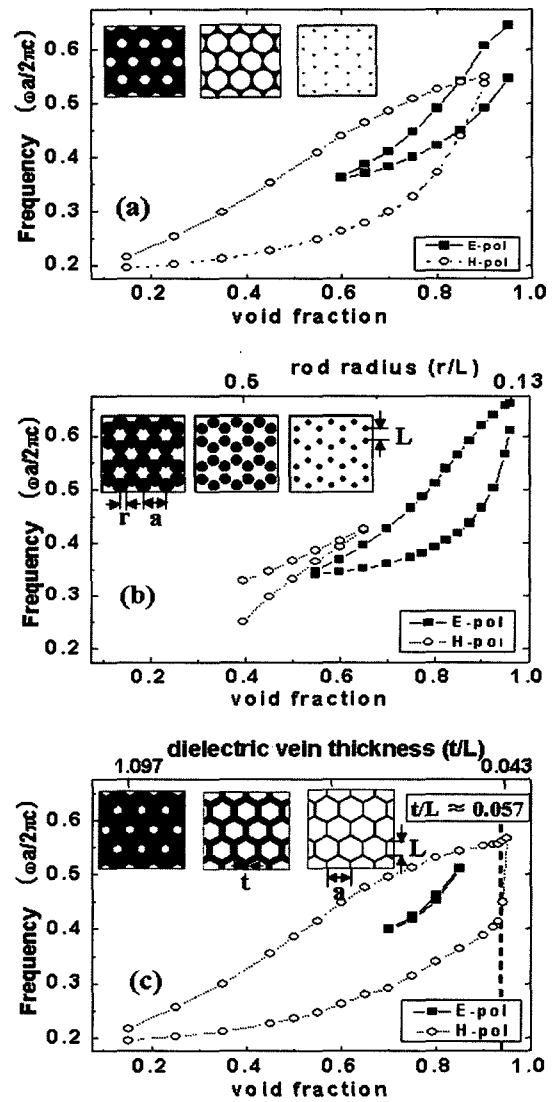


그림 2. 각 구조의 광밴드갭의 갭 지도, (a) 원형 공기구멍의 삼각격자 구조, (b) 원형 유전기둥의 벌집격자 구조, (c) 육각형 유전사슬의 삼각격자 구조. 각 그림의 삽입그림은 계산에 사용된 개략적인 구조를 보여주고 있으며, 삽입그림의 어두운 부분은 고광학계수가 11.25인 유전물질 영역을 나타내고, 밝은 부분은 광학계수가 1.0인 공기영역을 나타낸다.

장 큰 E-편광 모드의 광밴드갭을 갖는다. 이 구조에서 원형 유전기둥의 반지름 'r'이 점점 작아지면, 즉 void fraction이 점점 증가하게 되면 원형 유전기둥의 고립성은 보다 강조되고, E-편광 모드의 광밴드갭이 서서히 커지는 것을 알 수 있다. 원형 유전기둥이 적절한 간격과 크기를 유지할 때, 즉 void fraction이 약 0.85일 때 E-편광 모드의 광밴드갭은 최대가 된다.

위의 구조와는 반대로, 원형 공기구멍의 삼각격자 구조[그림 2-(a)]에서 'spot'을 무시하고 'vein'부분을 강조한 전형적인 구조는 육각형 유전사슬의 삼각격자 구조가 된다[그림 2-(c)의 삽입그림]. 이는 유전체[그림 2-(c)의 삽입그림 중 어두운 부분]의 연결성이 강조된 구조라 할 수 있으며, 가장 큰 H-편광 모드의 광밴드갭을 갖는다.

**2. 최대의 절대 광밴드갭을 위한 구조**

2차원 광자결정이 가능한 한 큰 절대-광밴드갭을 갖기 위해서는 유전체가 서로 연결되어 있으면서 가능한 큰 'spot'을 갖는 구조의 꼴이 되어야 한다. 따라서 상기 결과를 기반으로 E-편광 모드의 갭에 영향을 주는 유전체의 고립성과, H-편광 모드의 갭에 영향을 주는 연결성의 두 변수를 독립적으로 조절하여, 그 최적비를 가질 수 있는 구조를 찾아 보았다. 그림 3-(a)의 삽입그림은 앞의 두 극한적인 구조[그림 2-(b), (c)]를 혼합한 최적 구조의 개요도와 계산에 사용된 변수들을 보여주고 있다.

그림 2-(a)의 원형 유전기둥의 벌집격자 구조로부터 'spot' 부분에 해당하는 원형 유전기둥의 크기가 변함에 따라 E-편광 모드의 광밴드갭의 위치와 크기가 변함을 알 수 있었다. 또한 그림 2-(b)의 첫 번째 삽입그림과 같이 원형 유전기둥의 크기가 커서 서로 맞닿는 경우 연결성이 유지되어 H-편광 모드의 광밴드갭이 존재하지만, 그림 2-(b)의 두 번째 혹은 세 번째 삽입그림과 같이 원형 유전기둥의 크기가 작을 경우 서로 고립되어 H-편광 모드의 광밴드갭이 닫히게 된다. 즉, 유전체의 연결성이 깨지고, 고립성이 강조되면서 H-편광 모드의 밴드갭은 닫히고, E-편광 모드의 밴드갭이 열리게 되는 것이다. 따라서 'spot'의 크기에 상관없이 유전체의 연결성을 독립적으로 계속 유지시켜 준다면, H-편광 모드의 광밴드갭이 닫히는 결과를 막을 수 있을 것이다. 이러한 결과는 최적의 구조에서 유전사슬(그림 3-(a)의 삽입그림 중 직선부분)의 두께 't'를 일정하게( $t/L = 0.07$ ) 유지시키면서 원형 유전기둥(그림 3-(a)의 삽입그림 중 원부분)의 반지름 'r'을 줄여감으로써 관찰할 수 있었다[그림 3-(a)]. 그림 3-(a)의 결과는 유전체의 연결성을 항상 유지시켜 줌으로써 H-편광 모드의 광밴드갭을 계속 넓게 유지시킬 수 있다는 것을 보여준다.

그림 2-(c)의 유전사슬로만 이루어진 구조로부터 'vein'부분의 두께가 변함에 따라 H-편광 모드의 광밴드갭의 위치와 크기가 변함을 알 수 있었다. 하지만, 이 구조는 유전체가 서로 일정한 크기로 연결되어 있을 뿐, 고립성이 없기 때문에 E-편광 모드의 광밴드갭이 거의 나타나지 않았다. 따라서 유

전체의 'vein'부분의 두께나 연결성에 상관없이 'spot'부분의 크기를 일정 크기 이상으로 유지시켜 준다면, E-편광 모드의 광밴드갭이 열려있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 결과는 최적의 구조에서 원형 유전기둥의 반지름 'r'을 일정하게( $r/L = 0.25$ ) 유지시키면서 유전사슬의 두께 't'를 줄여감으로써 관찰할 수 있었다[그림 3-(b)]. 그림 3-(b)의 결과는 유전체의 고립성을 강조시켜 줌으로써 E-편광 모드의 광밴드갭을 점차 넓어지게 할 수 있다는 것을 보여준다. 더욱이, 유전 사슬의 두께 't/L'이 0.057 보다 작아지면, 다시 말해 'vein'의 두께가 매우 좁아지면 H-편광 모드의 광밴드갭 역시 급격히 닫힘을 알 수 있다. 이는 육각형 유전사슬의 삼각격자 구조에서의 경우와 동일하다[그림 2-(c)].

마지막으로 최대의 절대-광밴드갭을 갖는 최적 구조의 변

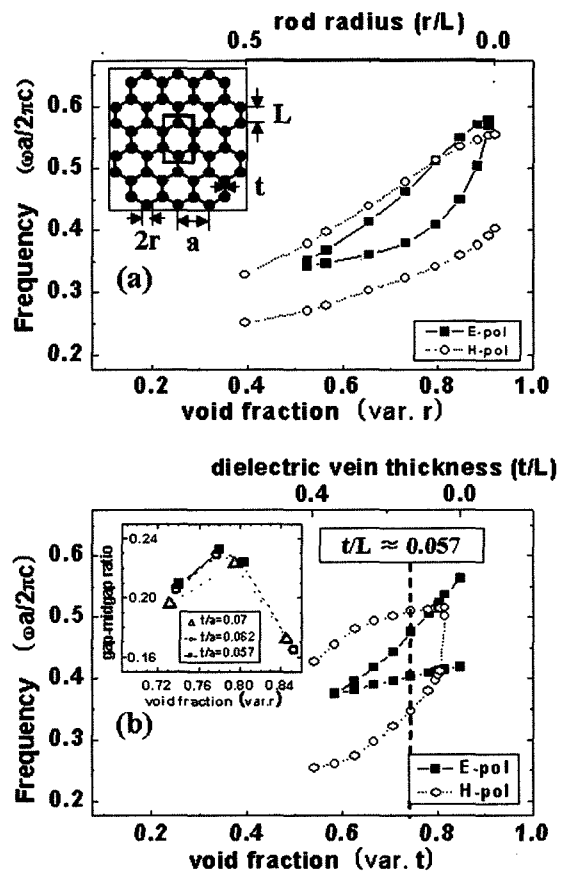


그림 3. 최대 광밴드갭을 위한 최적 구조의 갭 지도, (a) 유전사슬의 두께 't/L'을 0.07로 일정하게 유지시키면서 원형 유전기둥의 반지름 'r/L'을 줄여감에 따른 갭 지도. 삽입그림은 최적 구조의 개략도를 나타내며 삽입그림의 어두운 부분은 고광학계수가 11.25인 유전물질 영역을 나타내고, 밝은 부분은 광학계수가 1.0인 공기영역을 나타낸다. (b) 유전기둥의 반지름 'r/L'을 0.25로 일정하게 유지시키면서 유전사슬의 두께 't/L'를 줄여감에 따른 갭 지도. 삽입그림은 유전사슬의 두께 't/L'이 0.07, 0.062, 0.057인 각각의 구조에 대해 원형 유전기둥의 반지름 'r/L'을 줄여감에 따른 절대 광밴드갭 비율( $\Delta\omega/\omega_c$ )의 최적 계산 결과.

수를 찾기 위해, 다른 유전사슬 두께를 갖는 몇 가지 구조 각각에 대해 원형 유전기둥의 반지름을 줄여감에 따른 절대-광밴드갭의 비율( $\Delta\omega/\omega_c$ )을 계산하였다[그림 3-(b)의 삽입그림]. 그 결과, void fraction이 0.76~0.81 정도 일 때 항상 큰 절대-광밴드갭이 존재하며, 그 최대의 절대-광밴드갭( $\Delta\omega/\omega_c$ )은 약 23.2% 정도(at void fraction~0.78,  $t/L\sim 0.057$ ,  $r/L\sim 0.27$ )임을 발견하였다. 이는 원형 공기구멍의 삼각격자 구조의 절대-광밴드갭(17.86%)보다 약 30% 가량 증대된 것으로서, 최대 광밴드갭을 갖는 2차원 광결정 구조의 결과라 할 수 있다[표 1]. 또한, 최대의 절대-광밴드갭의 규격화된 주파수 영역은 0.39816-0.50259 이며, 이는 만약 격자상수 'a'가 644 nm 일 경우, 1281 nm~1617 nm의 매우 넓은 파장 대역에 해당한다.

### III. 결 론

2차원 광자결정의 광밴드갭은 구조 변화에 따라 그 크기와 위치가 변하게 되는데, 그 변화경향은 두 가지 독립된 편광 모드에 대해 서로 상반된 특성을 가진다. 이러한 상반된 특성은 본문의 전형적인 두 구조, 원형 유전기둥의 벌집격자 구조와 육각형 유전사슬의 삼각격자 구조에서 잘 나타나고 있다. 따라서 두 구조를 조합하여, 유전체의 연결성을 적당히 유지하면서 고립성도 가지는 최적 구조를 제안하고 그 최적비를 찾아내었다. 본 논문에서 찾아낸 최적 구조에서의 최대 절대-광밴드갭( $\Delta\omega/\omega_c$ )은 약 23.2%(고광학계수,  $\epsilon_{high}=11.25$ 일 때) 정도로서, 기존의 삼각격자 구조의 최대 절대-광밴드갭 보다 30% 가량 증대된 것임을 확인하였다. 최적화된 구조의 유전사슬의 두께 't'는 격자상수 'a'가 644 nm일 경우, 약 20~30 nm로 매우 얇아 직접적인 구조제작은 용이하지 못할 수도 있으나 원형의 공기구멍만이 아닌 변형된 다각형 모양의 구멍을 형성할 경우 본 논문에서 제안한 최적의 구조와





structure	void fraction	$\Delta\omega$	$(\Delta\omega/\omega_{mid})$
	0.85	0.08844	0.17858
	-	-	-
	0.80	0.00722	0.015799
	0.78	0.10443	0.231873

표 1. 여러 가지의 각 구조에 대한 최대 절대 광밴드갭 ( $\Delta\omega$ )과 중심 주파수에 대한 절대 광밴드갭 비율 ( $\Delta\omega/\omega_{mid}$ ). 삽입 그림의 어두운 부분은 광학계수가 높은 부분으로서 고광학계수 11.25인 유전물질 영역을 나타내며, 삽입그림의 밝은 부분은 광학계수가 1.0인 공기 영역을 나타낸다.

비슷한 구조를 손쉽게 구현할 수 있으며, 이는 2차원 광자결정의 제작에 유연성을 가져다 줄 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 인하대학교 집적형광자기술연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
- [2] S. John, Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987).
- [3] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819 (1999).
- [4] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. K. Park, D. H. Jang, and Y. H. Lee, IEEE Photon. Technol. Lett. 12, 1295 (2000).
- [5] N. Susa, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 39, 6288 (2000).
- [6] J. D. Joannopoulos, R. D. Meada, and J. N. Winn, Photonic Crystals; Molding the Flow of Light (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995) pp. 43-44.
- [7] W. D. Zhou, J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, B. Kochman, E. W. Berg, P. -C. Yu, and S. W. Pang, IEEE J. Quantum Electron. 37, 1153 (2001).
- [8] M. Plihal and A. A. Maradudin, Phys. Rev. B 44, 8565 (1991).
- [9] D. Cassagne, C. Jouanin, and D. Bertho, Phys. Rev. B 53, 7134 (1996).
- [10] J. B. Nielsen, T. Sondergaard, S. E. Barkou, A. Bjarklev, J. Broeng, and M. B. Nielsen, Electron. Lett. 35, 1736 (1999).
- [11] C. M. Anderson and K. P. Giapis, Phys. Rev. Lett. 77, 2949 (1996).
- [12] X. Zhang, Z. -Q. Zhang, L. -M. Li, C. Jin, D. Zhang, B. Man, and B. Cheng, Phys. Rev. B 61, 1892 (2000).
- [13] P. R. Villeneuve and M. Piché, Phys. Rev. B 46, 4969 (1992).
- [14] M. Y. Chen and R. J. Yu, IEEE Photon. Technol. Lett. 16, 819 (2004).
- [15] N. Susa, J. Appl. Phys. 91, 3501 (2002).
- [16] M. Qiu and S. He, Phys. Rev. B 60, 10610 (1999).
- [17] X. -H. Wang, B. -Y. Gu, Z. -Y. Li, and G. -Z. Yang, Phys. Rev. B 60, 11417 (1999).
- [18] L. F. Marsal, T. Trifonov, A. Rodríguez, J. Pallarés, and R. Alcubilla, Physica E 16, 580 (2003).
- [19] J. D. Joannopoulos, R. D. Meada, and J. N. Winn, Photonic Crystals; Molding the Flow of Light (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995) pp. 63-65.
- [20] M. Plihal and A. A. Maradudin, Phys. Rev. B 44, 8565 (1991).

## **Polarization-Independent 2-Dimensional Photonic Crystal Structure for Maximum Bandgap**

Jun Ho Sung, Beom Hoan O<sup>†</sup>, Seung Gol Lee, Se Geun Park and El Hang Lee

*Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA),  
School of Information & Communication Engineering, INHA University, Incheon 402-751, South Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: obh@inha.ac.kr*

(Received May 13, 2005, Revised manuscript June 15, 2005)

The large and polarization-independent photonic bandgap (PBG) is very useful to the application to various optical devices. Until present, it has been known that the PBG for a triangular lattice remains the largest both in the E- and H-polarized modes. However, we proposed a new structure with a larger polarization-independent PBG, by analyzing and systemizing the PBG opening trends as the structural changes. This optimal structure for maximum bandgap has more increased gap-midgap ratio ( $\Delta\omega/\omega$ ) of about 30% than the triangular lattice.

OCIS Code : 130.3120, 160.1190, 260.1180, 260.5430.