

유도결합형 플라즈마 식각공정을 통해 제작된 460 nm 격자를 갖는 나노 광결정 특성

최재호 · 김근주[†]
전북대학교 기계공학과

Fabrication of Nano-photonic Crystals with Lattice Constant of 460-nm by Inductively-coupled Plasma Etching Process

Jae Ho Choi and Keun Joo Kim[†]

[†]Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

The GaN thin film on the 8 periods InGaN/GaN multi-quantum well structure was grown on the sapphire substrate using metal-organic chemical vapor deposition. The nano-scaled triangular-lattice holes with the diameter of 150 nm were patterned on a polymethylmethacrylate blocking film using an electron beam nano-lithography system. The thin slab and two-dimensional photonic crystals with the thickness of 28 nm were fabricated on the GaN layer for the blue light diffraction sources. The photonic crystal with the lattice parameter of 460 nm enhances spectral intensity of photoluminescence indicating that the photonic crystals provides the source of nano-diffraction for the blue light of the 450-nm wavelength.

Key Words : Nanophotonics, Nanolithography, Photonic crystal, GaN semiconductor

1. 서 론

최근의 나노기술은 매우 발달하여 그 기술을 nano-photonic에 적용이 가능해졌고 nanophotonics의 주기적인 나노단위 격자 구조는 photonic crystal의 고유한 특성을 제공한다[1,2]. 이 photonic crystals은 빛의 파장과 유사한 격자율을 가지고 있고 photonic band gap에 의해 빛의 방출에 있어서 여러 영향을 받는다. 그리고 light emitting diode(LED)나 laser diode(LD)와 같은 광전자 소자에 적용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 반도체는 높은 굴절율을 가지고 있고 광전자 소자에서 매우 낮은 외부양자효율(external quantum efficiency)에 의해 빛의 방출을 방해 받는다[3,4].

Energy band gap이 넓은 반도체인 3족 질화물계 광전자 소자의 스펙트럼은 자외선부터 가시광선까지 널

리 연구되어져 왔으며, InGaN/GaN 다중양자우물형(multiple quantum well) LED의 양자우물 구조와 함께 photonic crystal구조를 사용함으로써 빛의 방출은 향상시킬 수 있다[5,6].

본 연구에서 우리는 photonic crystal구조를 GaN thin film 위에 삼각격자 구조로 식각하여 LED에서 광학적으로 증가된 빛의 추출 특성을 연구하였다.

2. 광결정 이론

Fig. 1은 InGaN/GaN 다중양자우물형 청색 LED 구조의 p-GaN층 위에 제작한 광결정 구조로서, 유전율 10.4인 GaN박막에서 2차원 공기의 광결정구멍의 반경은 r 이고 격자상수가 a 인 삼각격자 단위 cell을 갖는다.

유전체 구멍들이 삼각격자 구조로 되어 있으며 간격이 주기적으로 구성되어 있는 2차원 photonic crystal로 xy -평면에서 photonic band gap을 가진다. 이 gap 내에서는 확장된 상태가 허락되어지지 않고 평면의 어떤

[†]E-mail : kimk@chonbuk.ac.kr

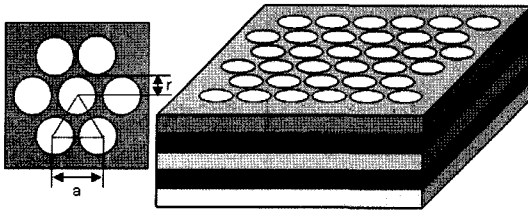


Fig. 1. Photonic crystal structure fabricated on p-GaN surface of InGaN/GaN multi quantum well blue LED structure. The photonic crystal has a two-dimensional and hexagonal array of air holes with the radius r and lattice constant a .

방향에서든지 입사하는 빛이 반사되어진다.

2차원 photonic crystal은 xy -평면에서 불연속적인 병진운동의 대칭을 가지고 있고 또한 z -평면으로 균일하며 파장벡터 kz 에서 평면파 특성을 가진다. 이러한 광결정내에서의 전자기파의 파동특성은 다음과 같은 Maxwell 방정식으로부터 유도된다[7].

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

진동 방법으로 band number n 과 Brillouin zone의 xy -평면에서 파장벡터 $k_{||}$ 로 Bloch 이론을 적용함으로써 자기장은 다음과 같이 쓰여진다[2].

$$H(r) = \exp(ik_{||} \cdot \rho) \exp(ik_z z) U(\rho) \quad (2)$$

여기서 모든 격자 벡터는 R 로 $U(\rho) = U(\rho + R)$ 이며 $U(\rho)$ 는 주기함수이다. 만약 $k_z = 0$ 이면 즉 xy -평면에서 빛이 정확히 전파하면 그 때의 시스템은 xy -평면을 통한 굴절율에서는 불변한다. 이 거울 대칭은 두 개의 다른 편광에서 분류할 수 있다. Transverse electric(TE) 형식은 평면에서 자기장 $H = H(\rho)z$ 라는 H 법선을 가지고 있고 전기장 $E(\rho)z = 0$ 라는 E 를 가지고 있다. Transverse magnetic(TM) 형식에서는 단지 반대이다. ($E = E(\rho)z$ and $H(\rho)z = 0$) 이러한 전자기 평면파의 합으로 자기장을 표현하면 고유함수(eigenfunction)는 다음과 같다 [8].

$$H(r) = \sum_G \sum_{\lambda=1,2} h_{G,\lambda} P_{\lambda} e^{i(k+G) \cdot r} \quad (3)$$

여기서 파수벡터 k 는 Brillouin zone내에 있으며 G 는 역격자의 합으로 나타내며, P 는 $k+G$ 에 직교하는 편광 벡터이다. 평면파의 전개에서 포함된 파동벡터의 크기를 제한함으로써, 유한 크기의 합을 얻을 수 있으며,

고유치 방정식을 행렬형태로 표현할 수 있다[9].

$$\sum_{G,\lambda} H_{G,G}^{\lambda\lambda} h_{G,\lambda} = \omega^2 h_{G,\lambda} \quad (4)$$

$$H_{G,G} = \frac{1}{\epsilon_{G,G}} |k+G| |k+G| \begin{pmatrix} P_2 \cdot P_2 & -P_2 \cdot P_1 \\ -P_1 \cdot P_2 & P_1 \cdot P_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 $1/\epsilon_{G,G}$ 는 유전함수(dielectric function) $\epsilon(r)$ 의 Fourier 변환이다. 이러한 고유치(eigenvalue) 방정식은 수치해석(numerical analysis)방법으로 계산되며, 전자기파동에 관한 정규모드 계수(normal mode coefficient)와 주파수(frequency)특성을 제공한다. 2차원의 해에서는 평면파의 개수가 단위 편광방향당 140개로 수렴이 가능하였다[10].

구멍의 배열은 편광사이에 완전한 band gap 겹침을 형성하기 위해 매우 중요하다. 일반적으로 TM band gap은 나노막대 같은 고립된 높은 절연 지역의 격자에서 유리하고 TE band gap은 구멍같은 연결된 격자에서 유리하다. 이것은 유전 물질에서 고립된 spots 과 연결된 지역들 간의 photonic crystal을 배열하기 위해 중요하다. 공기구멍의 삼각격자는 충분히 커다란 반지름을 가진 구멍사이에 spots을 제공한다. 이렇게 배열된 높은 절연 spots이 좁은 veins으로써 인접한 spot에 연결되어진다[11, 12].

Fig. 2는 삼각격자를 갖는 육방구조의 광결정밴드맵의 지도(map)로 격자상수에 대한 구멍반경비에 따른 주파수 변화특성을 보여준다. 대체로 TE 모드는 구멍 반경비와 주파수가 상대적으로 큰 영역에서 밴드갭을 형성하며, TM모드는 작은 반경비와 주파수에서 형성됨을 알 수 있다. 이러한 두 모드의 중첩영역에서 완전한 광결정의 밴드갭이 형성되어지며, 빛의 전파가 불가능해진다[13, 14].

Fig. 3에 보여진 이런 격자의 band 구조는 0.5-0.57

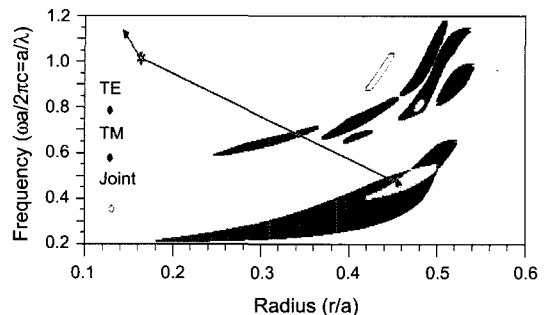


Fig. 2. Photonic band gap map of hexagonal structure.

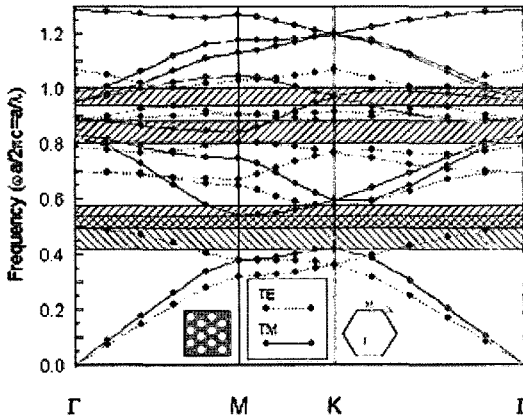


Fig. 3. The complete photonic band structure for the TE and TM modes.

의 주파수 영역 즉 구멍반경과 격자상수의 비가 $r/a=0.5$ 이고 $a=\lambda/2$ 인 파장의 반인 격자상수를 갖는 TE와 TM 편광사이에 photonic band gap을 가지고 있다.

3. 실험결과 및 토론

LED 구조는 MOCVD에 의해서 사파이어 기판위에 성장되었다. 기판위에 520°C에서 30 nm의 완충층이 성장되었고 n-type GaN이 1130°C에서 3 μm의 두께로 증착되었다. 다음으로 2 nm 높이의 wells과 8 nm 높이의 barriers가 반복적으로 성장된 발광층인 MQW(multiple quantum well)에서 450 nm의 청색 파장을 방출한다. 이 MQW층은 790°C에서 성장되었고 같은 온도에서 8주기의 InGaN well과 GaN barrier가 성장되었다. 마지막으로 200 nm의 p-type GaN층을 1130°C에서 성장한 다음 700°C에서 15분간 후속 열처리를 하였다.

이러한 LED구조의 광전자소자 위에 삼각격자의 2차원의 광결정을 격자상수가 460 nm이고 구멍의 직경은 150 nm로 일정하게 제작하였다. 이러한 광결정은 p-GaN 상층에 electron beam nano-lithography와 inductively coupled plasma(ICP) 식각공정을 통하여 형성되었다. 150 nm의 직경과 일정한 주기성을 가진 원형 구멍의 crystal 격자의 형태는 질화물 표면위에 도포된 polymethylmethacrylate (PMMA)에 형성되었다. Electron beam nano-lithography공정에 의해서 표면이 전자빔에 노출되어 형성된 패턴은 methylisobutyl ketone과 isopropyl alcohol 용액에 의해서 현상되어진다. 다음으로 건식 식각공정을 ICP 건식 식각장치를 이용하여 5 초 동안 수행되어졌다.

상온의 발광특성이 40 mW의 power를 가지고 325

nm파장으로 입사된 He-Cd laser source로 측정되었으며 또한 광결정의 배열 영상이 CD-SEM과 AFM에 의해서 조사되었다.

Fig. 4는 electron beam nano-lithography 을 수행하여 patterning한 PMMA sample의 CD-SEM 형상이다. 이것의 직경과 pitch는 각각 150과 230 nm이다. 여기서 electron beam은 pitch 230 nm pattern의 150 nm 직

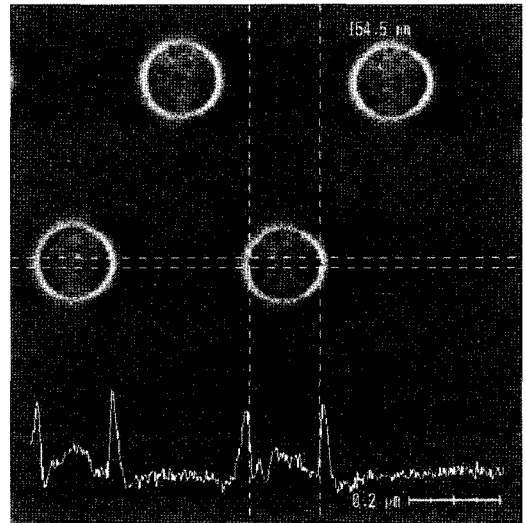


Fig. 4. The SEM image of the photonic crystal structure for the process of electron beam nano-lithography on PMMA photo-resist.

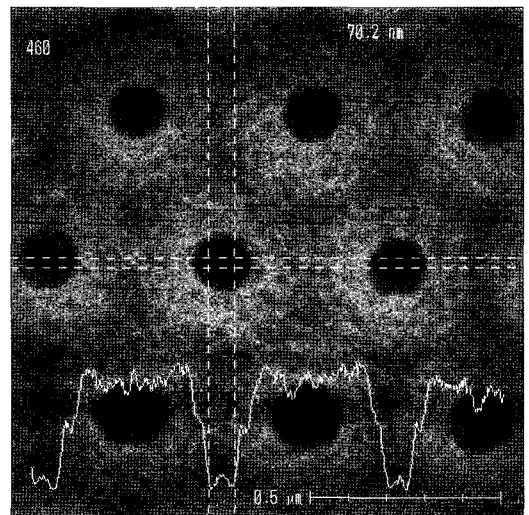


Fig. 5. The SEM image of the photonic crystal structure after the ICP etching process with the PMMA masking layer.

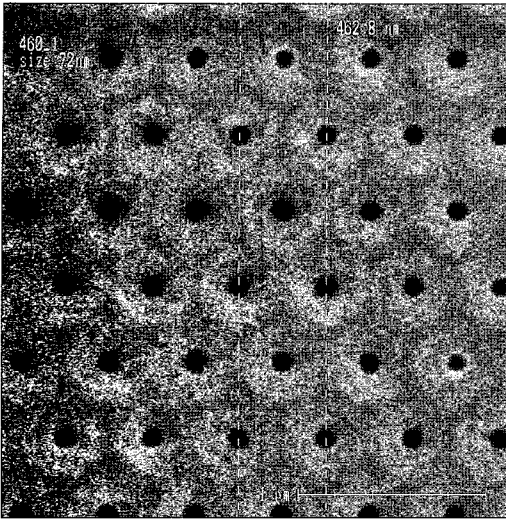


Fig. 6. The SEM image of the photonic crystal structure of GaN.

경내의 PMMA를 벗겨낸다. CD-SEM 형상은 반사된 세기의 차이를 보여준다.

Fig. 5는 유도결합형 고밀도 플라즈마(ICP)로 식각 후에 PMMA photo-resist마스크층을 남겨둔채 pitch 230 nm의 sample위의 CD-SEM 형상이다. 주요 ICP 식각 가스는 BCl_3 와 Cl_2 가 사용되었으며, 200 nm 두께의 photo-resist가 식각이 필요 하지 않는 부분에서의 플라즈마 가스에 의한 식각을 막고 식각된 부분의 형상은 구멍 밑바닥의 직경이 75 nm이고 상부의 직경은 150 nm인 웅덩이가 형성되었다.

Fig. 6은 PMMA가 없는 sample의 CD-SEM 형상이다. GaN photonic crystal은 ICP식각 과정 동안 매우 거친 표면으로 형성되었다. 이 PMMA이 제거된 구멍의 지름은 108 nm이며 표면의 거침과 구멍이 깊이는 AFM을 측정 함으로써 파악할 수 있다. 구멍의 육방 격자구조에서 spot과 vein의 형태상의 구조가 시각화 될 수 있다.

Fig. 7은 격자상수가 460 nm인 sample의 AFM형상이다. 이 형상은 골짜기 형상의 구멍 주위에 4개의 송곳 같은 기둥을 가지고 있다. 평균 직경과 구멍의 깊이는 각각 150과 28 nm이며 구멍의 상부와 하부의 직경은 각각 223과 108 nm이다.

이러한 광결정 형상에 대한 광 추출에 따른 결정특성을 Fig. 2에서의 GaN의 gap map으로부터 유추할 수 있다. 격자상수가 460 nm이고 구멍의 반지름이 75 nm로 설계된 광결정의 본 연구에서는 격자상수(a)와 파장(λ)의 비(a/λ)는 1.02이고 반지름(r)과 격자상수(a)의 비

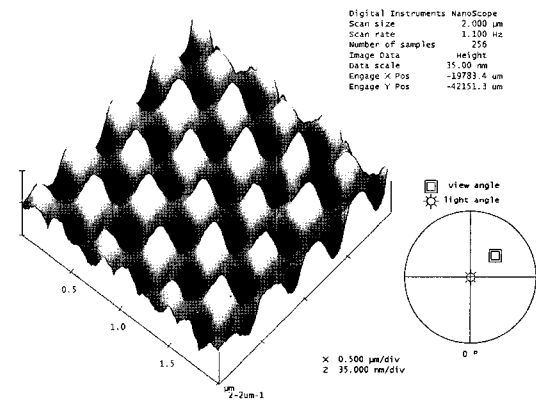
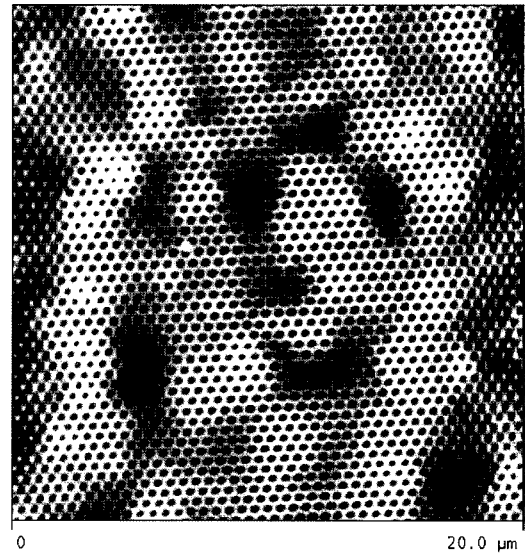


Fig. 7. The AFM image of the photonic crystal structure with the lattice constant of 460 nm.

(r/a)는 0.163으로 TE mode band gap과 TM mode band gap의 어느 곳에도 속하지 않음을 알 수 있다. 이러한 보강간섭특성을 발광특성 실험의 결과와 비교할 수 있다.

Fig. 8은 photonic crystal에서 격자상수가 460 nm일 때의 광결정시료와 광결정을 형성하지 않은 시료에 대한 photoluminescence (PL) spectra를 보여준다. InGaN /GaN multiple quantum well 구조로부터 빛의 파장이 450 nm인 청색이 방출하며 PL 세기는 광결정 시료에서 두 배로 증가함을 확인하였다. 광결정 시료에서 PL의 세기가 증가하는 현상은 비교적 굴절율이 높은 반도체 표면에서 빛이 전반사 되지 않도록 표면에 공기

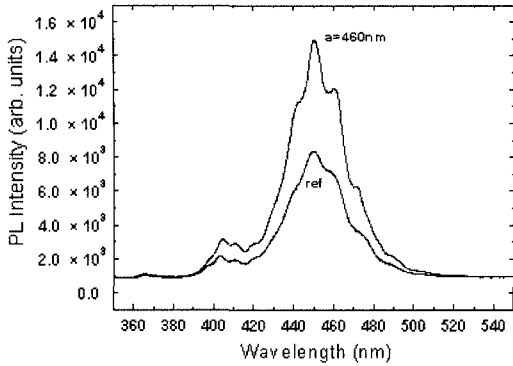


Fig. 8. Photoluminescence spectra for the bare sample without photonic crystal(ref) and the photonic crystal structure with the lattice constant of 460 nm.

구멍을 형성함으로써 연속적으로 굴절율을 변화시킨 결과이며 빛의 표면 방출효과를 증대시켰기 때문이다. 또한 격자주기와 발광파장의 주기가 보강간섭을 일으킬 수 있는 범위에서 광결정이 형성되었기 때문이다.

4. 결 론

MOCVD장비를 이용하여 사파이어 기판위에 성장된 InGaN/GaN양자우물구조와 Mg으로 도핑된 p-type GaN층을 성장하였다. 빛의 광원은 8주기의 InGaN/GaN multi-layers에서 발광하는 450 nm의 청색파장을 갖는다. 또한 p-GaN 표면 위에 격자상수와 파장의 비가 1.02인 photonic crystal를 제작하였다. PMMA 필름위에 150 nm 직경의 구멍을 electron beam nano-lithography 장비로 형성하였다. 광결정을 빛의 회절원으로 작용할 수 있도록 하기 위해 공기 구멍을 플라즈마 식각 공정을 통해 제작하였으며, AFM 측정 결과 경사진 원주형 상으로 식각 되어졌으며 종횡비(aspect ratio)가 0.187이다. 450 nm 파장의 청색광은 460 nm의 격자상수에서 보강간섭의 나노 회절 현상을 제공하였으며, 발광세기가 2배로 커짐을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF-2004-041-D00296) 연구비 지원으로 수행되었으며, nano-lithography process와 ICP etching process는 각각 National Nanofab Center와 Knowledge*on, Inc에서 수행되었음.

참고문헌

1. K. M. Ho, C. T. Chan and C. M. Soukoulis, "Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structure", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 65, No. 25, 3152-3155, 1990.
2. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals, Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, 1995).
3. S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos and E. F. Schubert, "High Extraction Efficiency of Spontaneous Emission from Slabs of Photonic Crystals", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 78, No. 17, pp. 3294-3297, 1997.
4. S. John and J. Wang, "Quantum Electrodynamics near a Photonic Band Gap : Photon Bound States and Dressed Atoms", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 64, No. 20, pp. 2418-2421, 1990.
5. W. M. Robertson, G. Arjavalingam, R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, "Measurement of Photonic Band Structure in a Two-Dimensional Periodic Dielectric Array", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 68, No. 13, pp. 2023-2026, 1992.
6. S. John and N. Akozbek, "Nonlinear Optical Solitary Waves in a Photonic Band Gap", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 71, No. 8, pp. 1168-1171, 1993.
7. Y. S. Chan, C. T. Chan and Z. Y. Liu, "Photonic Band Gaps in Two Dimensional Photonic Quasi-crystals", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 80, No. 5, pp.956-959, 1998.
8. N. Kawai, K. Inoue, N. Carlson, N. Ikeda, Y. Sugimoto, Asakawa and T. Takemori, "Confined Band Gap in an Air-Bridge Type of Two-Dimensional AlGaAs Photonic Crystal", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 86, No. 11, pp. 2289-2292, 2001.
9. K. Busch and S. John, "Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 83, No. 5, pp. 967-970, 1999.
10. M. Bayer, T. Gutbrod, A. Forchel, T. L. Reinecke, P. A. Knipp, R. Werner and J. P. Reithmaier, "Optical Demonstration of a Crystal Band Structure Formation", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 83, No. 25, pp. 5374-5377, 1999.
11. A. A. Sukhorukov, D. Neshev, W. Krolikowski and Y. S. Kivshar, "Nonlinear Bloch-Wave Interaction and Bragg Scattering in Optically Induced Lattices", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 92, No. 9, pp. 093901-1~093901-4, 2004.
12. A. Chutinan, S. John, and O. Toader, "Diffractionless Flow of Light in All-Optical Microchips", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 90, No. 12, pp. 123901-1~123901-4, 2003.
13. C. M. Anderson and K. P. Giapis, "Larger Two-Dimensional Photonic Band Gaps", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 77, No. 14, pp. 2949-2952, 1996.
14. A. Rung and C. G. Ribbing, "Polaritonic and Photonic Gap Interactions in a Two-Dimensional Photonic Crystal", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 92, No. 12, pp. 123901-1~123901-4, 2004.