

광 검출을 위한 광결정 공진기 배열 구조

Photonic crystal cavity arrays for photon detection

양진규, 권순홍, 서민교, 이용희, 황인각*
 한국과학기술원 물리학과, *전남대학교 물리학과
 jin9yang@kaist.ac.kr

최근 10년간 수많은 연구자들이 광결정을 이용하여 다양한 광소자를 구현하는데 많은 관심을 가져왔다. 특히 광결정을 이용한 레이저의 경우 밴드 가장자리 모드를 이용한 공진 흡수를 통해 문턱 값을 낮추려는 노력이 있었는데⁽¹⁾, 이는 광결정의 모드 밀도가 높은 영역을 이용하면 광 이득을 증대시킬 수 있음을 보여주는 결과이다⁽²⁾. 이러한 현상을 토대로 광결정 모드에 의한 공진 흡수 현상을 이용할 경우 간단한 2차원 광결정 박막 구조만으로도 효율적인 광 검출이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 광 검출 소자 구현을 위해 광결정에 수직으로 입사하는 빛과 광결정 모드와의 결합력을 증대시켜 효율적인 광 검출이 이루어질 수 있는 구조로 광결정 박막에 단일 결합공진기를 2차원 배열한 구조(coupled cavity array)를 제안하였다.

먼저 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 계산법을 이용하여 광 검출기에 적합한 광결정 공진기를 설계하였다. 효과적인 광 검출을 위해서는 외부에서 입사하는 빛과 광결정 모드간의 결합 효율을 증가시키고 결합된 광결정 모드와 이득 매질간의 상호 작용을 증가시켜야 한다. 먼저 수직 결합 효율을 증가시키기 위해 단일 결합 공진기에 존재 가능한 모드 중의 하나인 dipole 모드를 이용하였다. Dipole 모드는 본래 수직 방향으로 빛을 방출시키는 특성을 가지고 있어 높은 수직 결합 효율을 얻을 수 있다. 또한 모드의 전기장 분포가 물질 내에 잘 분포하고 있어서 이득 매질과의 상호 작용이 클 것으로 기대된다. 하지만 모드의 크기가 작고, 빛이 박막에 머무르는 시간을 결정하는 모드의 품위 값(Quality factor)이 작다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 단일 공진기를 2차원 배열로 반복시키므로 이득 매질과의 상호 작용 영역을 증가시켰고, 단일 공진기의 주변 공기구멍의 모양을 변형시키므로 품위 값을 증가시켰다. 그림 1 (a)에는 광결정 공진기를 최적화한 방법을 보여준다. 공진기 주변 공기구멍을 변형시켜가면서 품위 값을 계산한 결과 주기의 0.3 배가 될 경우 최대가 되었는데 이때의 전기장 분포가 그림 1 (c)에 나타나있다. 전기장의 세기 분포를 보면 최대인 부분이 공진기 내부에 잘 위치해 있어서, 모드와 물질간의 상호작용이 클 것으로 기대된다. 또한 먼 장(far field) 분포도를 보면 빛의 방출이 가운데, 즉 수직 방향으로 이루어짐을 알 수 있다. 이는 모드의 수직 결합이 높다는 것을 의미한다.

이상의 FDTD 계산을 바탕으로 InGaAsP/InP 단일 양자 우물 이득 매질을 이용하여 시료를 제작하였다. 그림 2(a)에는 제작된 시료의 SEM 사진이 나타나있다. 광결정 박막의 두께는 약 200nm이고 전체 면적은 대략 30 x 30 μm^2 정도로 제작하여 실제 이득 매질과의 상호 작용 면적을 증가시켰다. 제작된 시료는 주기가 540nm 이고 공기구멍은 설계보다 다소 크게 제작되었다. 먼저 광펄스에 의한 PL 스펙트럼을 살펴보면, 1530nm 영역에서 x 편광의 빛이 방출되고 있음을 알 수 있다. 또한 가변 레이저로 반사율을 측정한 결과, x 편광 입사 빛의 경우에 한해서만 같은 파장에서 Fano line shape을 발견할 수 있다. Fano-resonance란 광결정 박막에 빛이 입사할 경우 입사파가 광결정 모드와 결합하여 생겨나는 현상이다⁽³⁾. 이상의 결과를 종합해 보면 제작된 시료의 경우 1530nm 파장 영역에 광결정 모드가 존재하는데 이 모드는 x 축으로 편광된 빛과 수직 결합할 수 있는 모드로 FDTD 계산 시 얻은 dipole 모드와 그 특성이 일치한다.

이상을 요약하면, 간단한 광결정 박막구조를 이용한 광 검출을 위해 단일 결함 공진기를 2차원 배열시키고 주변 공기구멍을 변형시켜서 수직 결합력이 높은 광결정 모드인 dipole-like 모드를 실험적으로 얻었고, 광펌핑을 통한 PL과 가변 레이저를 이용한 반사율 측정을 통해 모드의 편광 특성을 살펴보았다.

1. F. Raineri, G. Vecchi, A. M. Yacomotti, C. Seassal, P. Viktorovitch, R. Raj, and A. Levenson Appl. Phys. Lett. 86, 011116 (2005)
2. F. Raineri, G. Vecchi, C. Cojocar, A. M. Yacomotti, C. Seassal, X. Letartre, P. Viktorovitch, R. Raj, and A. Levenson, Appl. Phys. Lett. 86, 091111 (2005)
3. S. Fan, W. Suh and J. D. Joannopoulos, J. Opt. Soc. Am. A 20, 569 (2003)

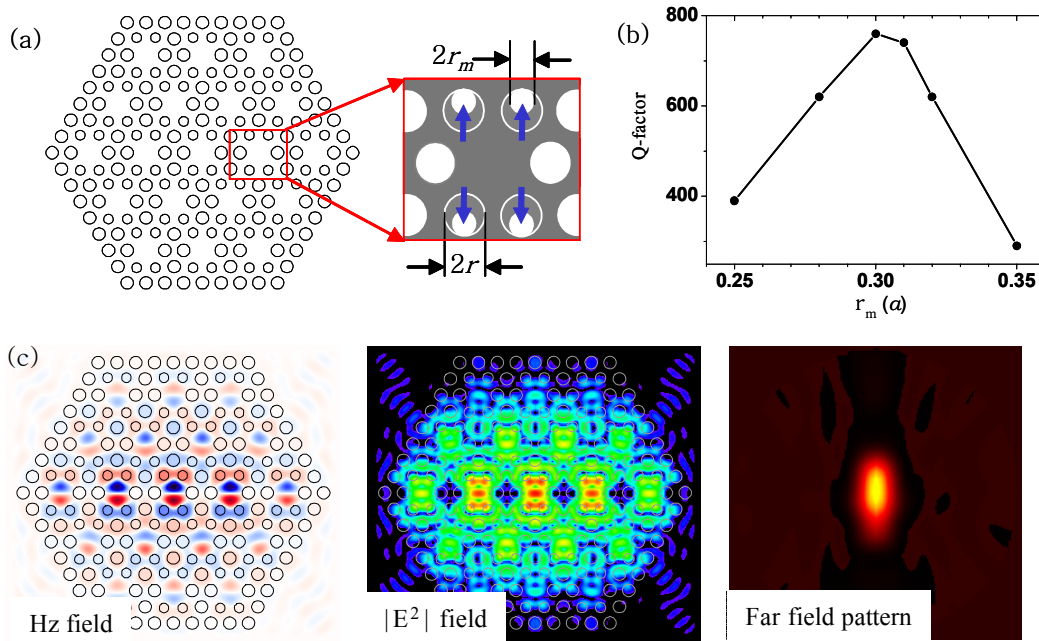


그림 1 Dipole-like mode를 위한 구조 최적화. (a) 구조 최적화 방법 (b) 공기 구멍 변형에 따른 품질값 변화 (c) $r_m=0.3a$ 인 경우의 X dipole mode의 field 분포

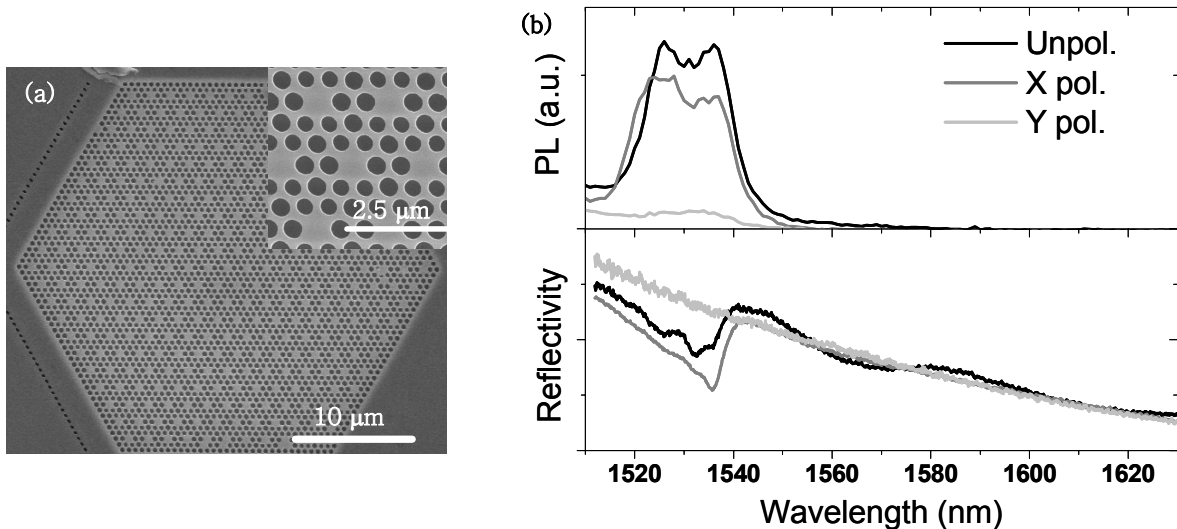


그림 2 (a) 제작된 시료의 SEM 사진 $a \sim 540\text{nm}$, $r/a \sim 0.4$ $r_m/a \sim 0.35$ (b) 광펌핑 측정 결과 및 반사율 측정