

2차원 정방형 격자 광결정 슬랩 단일 결함 레이저

Two-Dimensional Square Lattice Photonic Crystal Slab Single Defect Laser

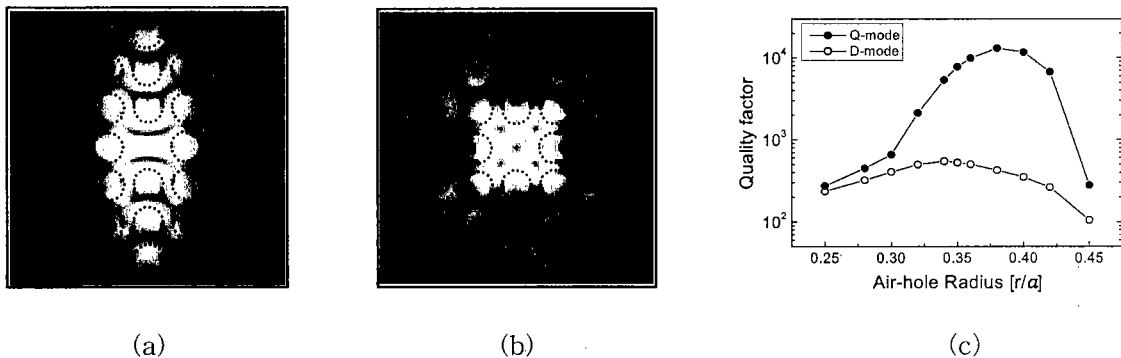
류한열*, 김세헌*, 박홍규*, 황정기*, 김정수**, 이용희*

*한국과학기술원 물리학과, **전자통신연구원 원천기술본부

hyryu@mail.kaist.ac.kr

최근에 2차원 광결정 슬랩 구조를 이용한 레이저가 발견되어 많은 관심을 받고 있다.^(1,2) 대부분의 광결정 레이저는 TE 편광에 대해서 넓은 밴드갭을 가지고 있는 삼각형 결정을 기반으로 하고 있다. 삼각형 결정을 이용한 단일 결함 레이저에서는 쌍극 형태에의 모드가 공진 모드로 존재하게 되고 레이저 발진을 하게 된다. 그런데, 이러한 쌍극 모드 단일 결함 광결정 레이저에서 모드의 Q인자(Q)는 수백 정도로 작은 편이고 대부분의 광손실이 슬랩의 바깥쪽에서 일어나게 된다.⁽³⁾ 그리고, 공진기의 Q는 공진기 자체의 형태보다는 공진기에 존재하는 모드의 모양이 더 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 삼각형 격자가 아닌 다른 형태의 광결정 격자 구조를 연구해 보면 새로운 형태의 모드의 존재를 기대할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 삼각형 격자 대신 정방형 격자 구조에서 단일 셀 공진기 모드를 연구해 보았다. 정방형 격자는 광밴드갭의 크기가 삼각형 격자에 비해 매우 작아서 이때까지 거의 연구되지 않아왔다.

먼저 정방형 격자 광결정 슬랩에서 단일셀의 모드를 3차원 시간공간 유한차 방법(FDTD)으로 조사해 보았다. 두 가지 형태의 모드가 존재하는데, 하나는 이중 축퇴된 쌍극모드(dipole mode)이고 다른 하나는 비축퇴된 사중극모드(quadrupole mode)이다. 각각의 모드 형태를 [그림 1]의 (a)와 (b)에 나타내었다. 특이할 것은 홀극모드는 정방형 격자의 광밴드갭 바깥쪽에 존재한다는 것이다. 이는 홀극모드는 격자의 한쪽 방향으로 진동하는 형태이므로 그 방향으로의 밴드갭이 중요하게 되어서 평면상의 모든 방향으로의 밴드갭이 존재할 필요는 없는 것이다. 사중극 모드는 대부분의 경우 밴드갭 영역 안에 존재하게 된다. 각각의 모드의 Q를 계산하여 반경의 함수로 [그림 1]의 (c)에 나타내었다.



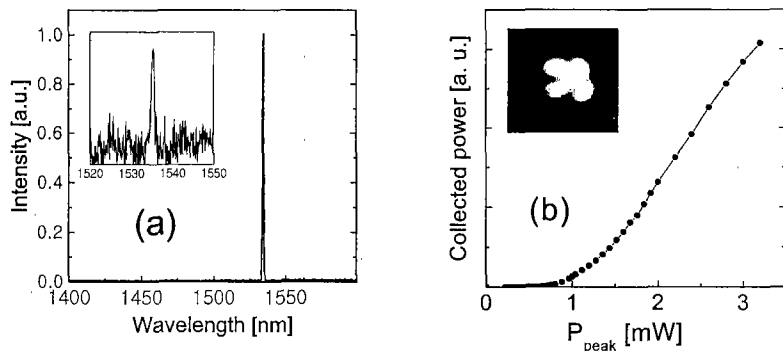
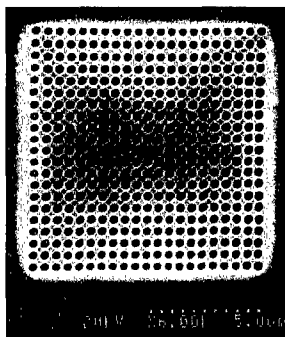
[그림 1] 2차원 광결정 슬랩 정방형 격자 단일 결함 공진기에 존재하는 모드의 형태와 Q. 유전체 물질의 굴절률은 3.4로 두고 슬랩의 두께는 격자 상수의 0.4배로 두었다. (a) 홀극모드, (b) 사중극모드, (c) 공기 구멍의 반경에 따른 각각의 모드의 Q.

홀극 모드의 Q는 수백 정도로서 기존에 발표된 삼각형 격자의 홀극 모드의 Q와 비슷한 정도이다. 사중극 모드의 경우 Q가 10,000 이상까지 존재할 수 있음을 볼 수 있다. FDTD 계산에서 계산 영역의 크기를 좀 더 넓힐 수 있다면 계산상으로 얻어지는 Q는 더 증가할 수 있을 것이다.

실제로 광결정 슬랩 구조를 제작하여 레이저 발진 실험을 수행하였다. 능동 매질은 1.5 μm 부근에서 발광하는 InGaAsP 양자 우물 구조이다. InP/InGaAsP wafer에 전자선 리소그라피와 건식 식각으로 광결정 패턴을 제작한 후 습식 식각으로 InP 층을 선택적으로 식각해 주면 공기 중에 떠 있는 형태의 InGaAsP 광결정 슬랩이 완성된다. 제작이 끝난 사각형 격자 단일 결합 공진기 형태의 광결정 슬랩을 [그림 2]에 나타내었다.

제작한 구조를 980 nm 레이저 다이오드를 이용하여 펄스로 광펌핑 하였고 상온에서 레이저 발진에 성공하였다. 두 모드 형태에서 모두 레이저 발진이 이루어 지는 것을 확인하였다. [그림 3]에는 사중극 모드에서 발진한 레이저 중 문턱이 가장 낮은 레이저의 발진 특성을 나타내었다. 발진 전 후의 스펙트럼을 [그림 3]의 (a)에 나타내었다. 발진 전 광발광(photoluminescence)에서 공진 모드의 선폭으로부터 모드의 Q를 구해보면 사중극의 경우에는 2,000, 쌍극의 경우에는 400 정도가 되어 계산과 대략적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. [그림 3]의 (b)에 나타낸 펌핑광의 세기에 따른 발진 레이저의 세기를 보면 문턱이 대략 0.8 mW 정도임을 알 수 있다. 펌핑광의 크기가 대략 3.5 μm 이고 1/3 정도가 능동 매질에 흡수된다고 가정하면 문턱 펌프광의 밀도는 2.5 kW/cm² 정도가 된다. (b)의 inset은 적외선 camera로 관찰한 모드의 형태이다. 네 개의 lobe가 사중극의 형태를 보여주고 있다.

본 연구를 통해서 사각형 결정 단일 결합 광결정 레이저의 특성을 살펴보았다. 쌍극 모드의 경우 광밴드갭 영역 밖에 존재하는데도 레이저 발진이 이루어질 정도의 큰 Q가 얻어지는 것을 볼 수 있었고, 사중극 모드의 경우 Q가 10,000 이상으로 매우 크게 되는데, 이 모드를 잘 이용하면 공진기 양자 전자학을 연구하는데 좋은 예가 될 수 있고 문턱이 거의 없는 레이저의 실현도 가능할 수 있을 것이다.



[그림 2] 제작된 사각형 격자 광결정 슬랩 단일 결합 공진기의 전자현미경 사진

[그림 3] 사중극 모드로 발진한 레이저의 발진 특성
(a) 펌프 세기가 5 mW일 때의 스펙트럼 (inset은 0.4 mW일 때)
(b) 펌프광의 세기에 따른 발진 파장에서의 레이저 파워 (inset은 적외선 camera로 관찰한 모드의 형태)

[참고 문헌]

1. O. Painter, R. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. O'Brien, P. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819 (1999).
2. J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. W. Song, H. K. Park, Y. H. Lee, and D. H. Jang, Appl. Phys. Lett. 76, 2982 (2000).
3. O. Painter, J. Vuckovic, and A. Scherer, J. Opt. Soc. Am. B 16, 275 (1999).

