사각형 광결정 슬랩에서 제작된 상온 발진 광결정 밴드 가장자리 레이저

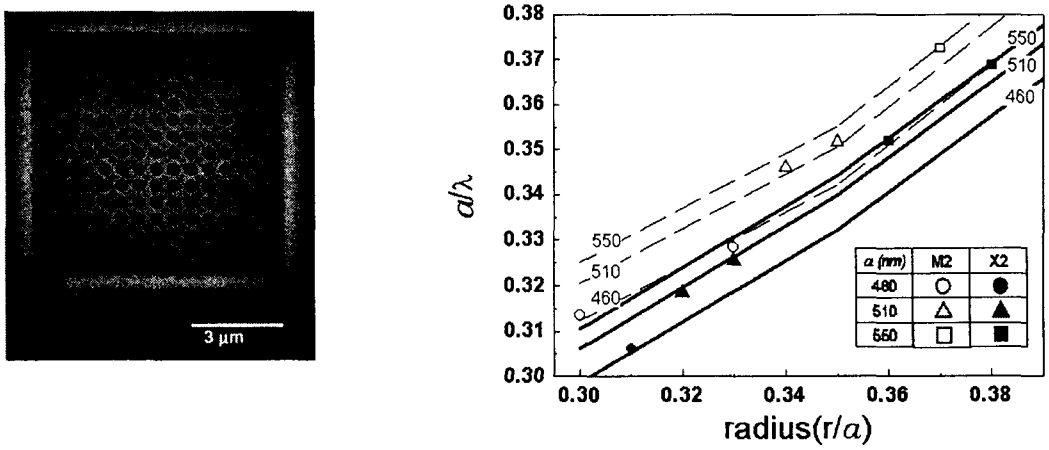
Room temperature photonic band edge lasers from two-dimensional square lattice photonic crystal slabs

권순홍, 김국현, 이용희
한국과학기술원 물리학과,
ksunong@kaist.ac.kr

최근 공진기 형태가 없는 2차원 광결정(photonic crystal) 레이저가 그것의 2차원 되먹임과 거울 없는 발진 현상과 같은 특이한 특성으로 인해 많은 관심을 끌고 있다[1-3]. 이러한 레이저는 photonic band edge에서 빛의 군속도의 감소에 근거하여 작동한다. 이 photonic crystal band edge 레이저는 2차원 형태의 Distributed-Feedback(DFB) 레이저 형태로 볼 수 있다. 지금까지 보고된 레이저는 0.1 정도의 매우 작은 굴절률 변화를 가지고 있고 크기가 $(100\mu m)^2$이상으로 상당히 크다. 한편, 공기 중에 떠있는 광결정 슬랩 구조에서는 굴절률 변화가 약 2이상으로 크기 때문에 band edge에서 광자 밀도가 크게 증가할 것으로 예상된다. 따라서 크기가 $(10\mu m)^2$이하에서도 photonic crystal band edge 레이저의 발진이 가능하다. 이전에 우리는 이 구조에 삼각형 격자를 뚫어서 저온, 77K에서의 Γ band edge 레이저의 발진을 보고한 바 있다[3]. 여기서 우리는 공기 중에 떠있는 광결정 슬랩에 사각형 격자로 만들어진 photonic crystal band edge레이저의 상온 발진을 보고한다.

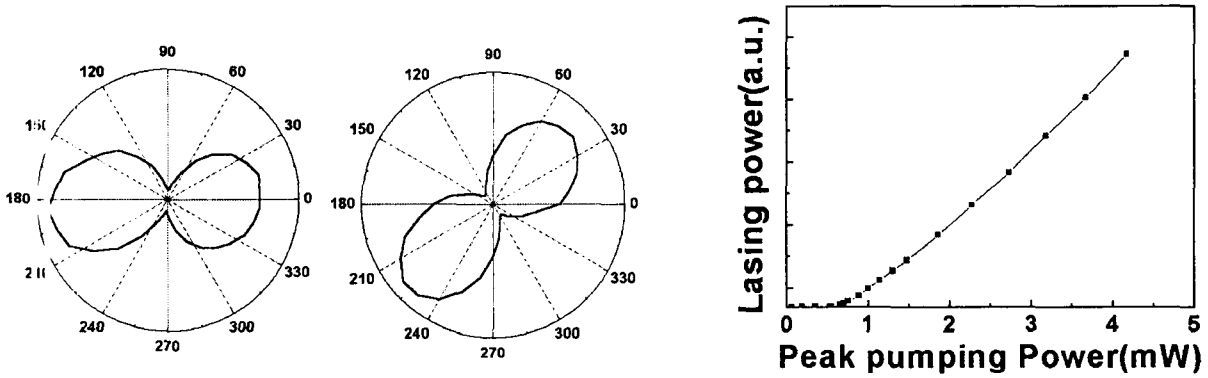
이득 물질로는 7층의 InGaAsP 양자우물을 사용한다. 공기 중에 떠있는 광결정 슬랩 구조는 전자빔 리소그래피, Cl_2 보조 Ar 식각, 그리고 선택적 습식 식각을 통해 제작된다[5]. 이 슬랩의 두께는 200 nm 이며 샘플의 크기는 약 7.5 μm이다. [그림. 1(a)]은 제작된 샘플의 SEM사진을 보여준다. 제작된 구조는 상온에서 980 nm 레이저 다이오드로 펄스폭은 5 ns이고 주기는 2 μs인 펄스로 광펌핑하게 된다. 펌핑 크기는 약 4μm 이다. 다양한 격자간격을 가지는 샘플로부터 1450 nm에서 1620 nm에 해당하는 다양한 파장의 레이저 발진이 관측되었다. 레이저 샘플의 격자상수는 400 nm에서 600 nm사이에 분포한다. 레이저는 TE같은 모드의 두 번째 밴드의 X점과 M점의 band edge에서 발진한다. 어떤 band edge에서 발진하는 지를 알기 위해 삼차원 평면파 전개방법을 통해 계산된 주파수를 [그림. 1(b)]에서처럼 구멍 반지름의 함수로 각 격자상수에 대해 비교했다. 이 그림에서 선은 계산된 두 번째 X점과 M점에서의 band edge 주파수고 점은 측정된 레이저의 주파수이다. 측정된 파장의 위치와 계산된 결과는 잘 일치한다. 그리고 파장뿐만 아니라 편광 특성을 통해서도 모드를 확인했다. 두 번째 X점 모드는 [그림. 2(a)]에서처럼 샘플에 대해 수평인 방향으로 선편광 되어 있거나 수직으로 선편광 되어 있다. 한편 두 번째 M점 모드는 [그림 2(b)]처럼 샘플에 대해 45도 방향이나 -45도 방향으로 선편광 되어 있다. 이러한 편광 특성은 측정된 photonic band edge 레이저가 X점과 M점에서 발진할 뿐만 아니라 1차원으로 진동하는 모드에서 발진함을 의미한다. [그림. 2(c)]에서는 입사되는 peak 펌핑 파워에 대해 발진파장에서 측정된 파워를 나타낸다. 약 0.62 mW정도의 낮은 문턱값이 관측된다. 이러한 낮은 문턱값을 가지고 작은 크기에

서 발진하는 band edge 레이저는 광집적 회로의 광원으로 큰 가능성을 가지고 있다.



(a) (b)

[그림 1] (a) 사각형 격자 band edge레이저의 SEM사진. 격자의 주기는 550 nm이고 반지름은 주기의 0.36배이다. (b) 두 번째 X점과 두 번째 M점 band edge 모드의 주파수의 구멍 반지름에 대한 함수. 실선과 점선은 각각 계산된 두 번째 X점과 두 번째 M점 band edge의 주파수를 나타내고 닫힌 점과 열린 점은 역시 각각 측정된 두 번째 X점과 두 번째 M점 band edge레이저의 주파수를 표시한다. 또한 원형 점, 삼각형 점, 그리고 사각형 점은 격자상수가 460 nm, 510 nm, 550 nm인 샘플의 발진 주파수에 해당한다.



(a) (b) (c)

[그림 2] (a) 두 번째 X점 band edge 레이저의 편광 (b) 두 번째 M점 band edge 레이저의 편광 (c) 두 번째 M점 band edge 레이저의 입사되는 peak 펌핑 파워에 대한 발진 파장에서의 파워

[참고 문헌]

1 S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A.Chutinan, and M.Mochizuki, "Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design", Science 293, 1123-1125 (2001) .

2 M. Meier, A.Mekis, A.Dodabalapur, A.Timko, R. E. Slusher, J. D. Joannoupoulos, and O. Nalamasu, "Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals", Appl. Phys. Lett. 74, 7-9 (1999).

3 H. Y. Ryu, S. H. Kwon, Y. H. Lee, and J. S. Kim, "Very-low-threshold photonic band-edge lasers from free-standing triangular photonic crystal slabs", Appl. Phys. Lett. 80, 3476- (2002).