

## 삼각형 광결정 슬랩에서 제작된 낮은 문턱값을 가지는 광결정 밴드 가장자리 레이저

### Very low threshold photonic band edge lasers from free-standing triangular photonic crystal slabs

권순홍\*, 류한열\*, 김정수\*\*, 이용희\*

\*한국과학기술원 물리학과, \*\*전자통신연구원 원천기술본부

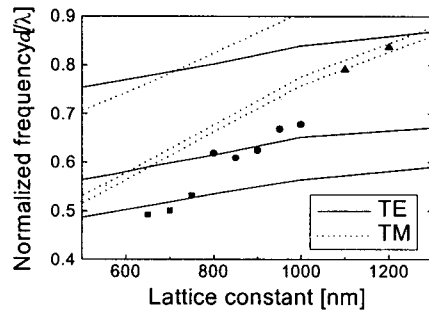
sunong@cais.kaist.ac.kr

최근 공진기 형태가 없는 2차원 광결정(photonic crystal) 레이저가 많은 관심을 끌고 있다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 레이저는 photonic band edge에서 빛의 군속도의 감소에 근거하여 작동한다<sup>(4)</sup>. 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  $(100\mu\text{m})^2$  이상으로 상당히 크다. 여기서 우리는 공기 중에 떠있는 광결정 슬랩 구조로 만들어진 photonic crystal band edge 레이저를 보고한다. 삼각형 격자구조의 공기구멍 배열에서 유효 굴절률의 변화는 2 이상이다. 그러므로 band edge에서 광자 밀도가 크게 증가할 것으로 예상된다.

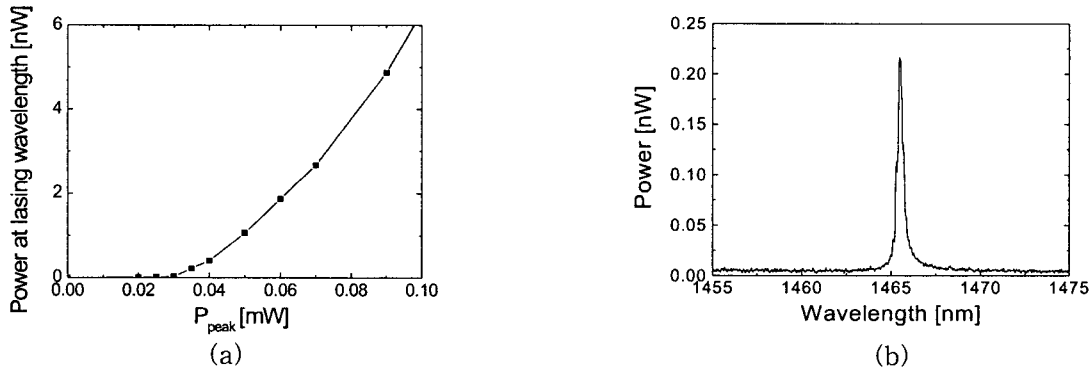
이득 물질로는 7층의 InGaAsP 양자우물을 사용한다. 공기 중에 떠있는 광결정 슬랩 구조는 전자빔 리소그래피,  $\text{Cl}_2$  보조 Ar 식각, 그리고 선택적 습식 식각을 통해 제작된다<sup>(5)</sup>. 이 슬랩의 두께는 200 nm이다. 제작된 구조는 80K에서 980 nm 레이저 다이오드로 펄스폭은 10 ns이고 주기는 250 ns인 펄스로 광평평하게 된다. 펄핑 크기는 약  $6\mu\text{m}$ 이다. 다양한 격자간격을 가지는 샘플로부터 레이저 발진이 관측되었다. 레이저 샘플의 격자상수는 650 nm에서 1200 nm 사이에 분포한다. 넓은 파장영역, 1290 nm~1480 nm에서 레이저 발진이 관측되었다. 레이저는 밴드구조의  $\Gamma$ 점의 몇몇 광밴드 가장자리에서 발진한다. 그러한 레이저는 [그림. 2 (b)]에서 발진형태에서 보여지듯이 수직으로 방출하는 특성을 나타낸다. 측정된 레이저의 파장은 [그림. 1]에서 격자상수의 함수로 보여진다. 여기서 레이저 샘플의 공기구멍의 반지름은 격자상수의 0.35배이다. 이 그림에서 선은 삼차원 FDTD(시간영역 유한차분법)로 계산된  $\Gamma$ 점에서의 band edge 주파수이다. 제일 밑의 선은 TE같은 모드의 두 번째 band edge에 해당한다. 측정된 파장의 위치와 계산된 결과는 잘 일치한다.

가장 낮은 문턱값을 가지는 1000 nm 격자상수의 photonic crystal band edge 레이저 특성을 [그림. 2]에서 보여준다. [그림. 2 (a)]는 입사되는 peak 펄핑 파워에 대해 발진파장에서 측정된 파워를 나타낸다. 약  $35\mu\text{W}$  정도의 매우 낮은 문턱값이 관측된다. 이 펄핑 파워에서 스펙트럼은 [그림. 2 (b)]에 보여진다. 선폭은 거의 스펙트로미터의 분해능으로 주어진다. 양자우물에 흡수된 펄핑 power density는 약  $25\text{ W/cm}^2$ 로 고려된다. 이러한 문턱파워와 power density는 보고된 반도체 레이저의 가장 낮은 값 중에 하나이다. 이 레이저의 광학적 손실은 매우 작을 것으로 예상되어진다. 레이저가 작동하는 세 번째 TE band edge의  $\Gamma$ 점에서 품위값은 무한대이며 FDTD계산으로 확인된다<sup>(6)</sup>. 게다가, 낮은 온도에서 carrier 비발광 결합이 낮아지고 능동 매질의 이득이 증가하므로 낮은 문턱값이 얻어질 수 있다. 이 photonic

crystal band edge 레이저는 매우 낮은 문턱값을 나타내고 새로운 형태의 마이크로 레이저로 큰 관심을 얻을 것이다.



[그림 1] 기호는 레이저들의 규격화된 주파수를 격자상수의 함수로 표시되었다. 선은  $\Gamma$  점에서 3차원 FDTD로 계산된 band edge 위치를 나타낸다. 공기구멍 반지름은  $0.35a$ 이다.



[그림 2] 1000 nm의 격자상수를 자기는 band edge 레이저의 특성 (a) 발진 파장에서 모아진 파워의 peak 펌프 파워에 대한 함수. (b) peak 펌프 파워가 0.035 mW일 때 스펙트럼

[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. Joannopoulos, and O. Nalamasu, "Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals", Appl. Phys. Lett. 74, 7-9 (1999).
3. M. Notomi, H. Suzuki, and T. Tamamura, "Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal lasers at several photonic band gaps", Appl. Phys. Lett. 78, 1325-1327 (2001).
4. J. P. Dowling, M. Scalora, M. J. Bloemer, and C. M. Bowdem, "The photonic band edge laser: A new approach to gain enhancement", J. Appl. Phys. 75, 1896-1899 (1994).
5. O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, "Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser", Science, 284, 1819-1821 (1999).
6. T. Ochiai and K. Sakoda, "Dispersion relation and optical transmittance of a hexagonal photonic crystal slab", Phys. Rev. B 63, 125107 (2001).