

## 단일 모드 광양자테 레이저

### Single mode photonic quantum ring laser fabricated with hyperboloid-drum structures

윤준호, 이승은, 장영흠, 권오대

POSTECH 전자과

jhdirac@postech.ac.kr

Photonic quantum ring (PQR) laser는 3차원 whispering gallery mode (WGM) 조건을 만족하는 반도체 레이저로써 매우 낮은 문턱전류, 낮은 온도 의존이란 양자선적인 특성을 가지고 있으며<sup>(1)</sup>, 이러한 특징은 저전력 display 기술, 고효율 LED의 dynamic특성 및 균일성 저하 문제 해소, nano-bio 칩 및 수백미터급 야간 surveillance illuminator 이용까지의 고집적 칩 등의 개발에 활용되고 있다. 본 발표에서는 최근 확인되기 시작한 single mode 발진의 PQR 레이저 연구결과를 보고하며 이는 차세대 고집적 광 interconnect, 근거리 광 communication 등에도 이용될 수 있을 것이다.

일반적인 메사타입 (mesa-type) PQR 레이저의 스펙트럼은 4~5 nm 폭에 여러 개의 개별모드를 가지고 있으며, 소자의 크기가 작아질수록 스펙트럼 상에 존재하는 모드수가 줄어들고, 모드간의 간격은  $1/R^2$  ( $R$  : 소자의 반지름)에 비례하는 특징을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> PQR 레이저의 활성층 직경 점점 줄어 약 4.0  $\mu\text{m}$  이하로 작아지게 되면 2개의 모드만이 존재하게 되며, Ref. (2)에서의 이론을 통하여 PQR 레이저의 첫 번째 모드와 두 번째 모드 사이의 간격과 두 번째 모드의 emission angle을 구하면 그림 1과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그림 1(a)은 모드간격 계산된 값과 이론값이, 1(b)은 두 번째 모드의 emission angle을 보여준다. 그림 1의 그래프에서 red empty-circles는 좌측부터 순서대로 활성층 직경 4.8, 4.2, 4.0, 3.1, 그리고 3.0  $\mu\text{m}$  소자를 측정된 데이터이다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이 계산된 값(empty square)과 측정된 값(red circles)이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 1(b)에 보이는 바, 이론적으로 활성층 직경이 900 nm 이하로 작아지게 될 경우 두 번째 모드의 emission angle은  $90^\circ$  이상으로 실측 모드 영역을 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이는 PQR 레이저 소자의 직경이 900 nm 이하에서부터 single mode 발진을 하기 시작함을 의미하며, 종래 많이 연구된 thumbtack 형태의 2차원 WGM 소자에서의 single mode 발진조건보다 더 작은 직경으로 되는 결과도 3차원 WGM 모델해석으로 규명된다.<sup>(2)</sup>

원주형 메사로 900 nm 이하 직경을 가진 소자를 만들기에는 일반적인 리소그래피 작업으로는 거의 불가능하다. 그 이유는 1  $\mu\text{m}$  이하의 pattern을 가진 UV 리소그래피용 Cr-mask 제작의 어려움과 전류 주입을 위해 필요한 소자 위 표면에 전극형성(p-electrode)이 불가능하기 때문이다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 CAIBE(Chemically Assited-Ion Beam Etching)에서 3차원 tilting의 특수 에칭공정법으로 Hyperboloid-Drum (H-D) 구조로 PQR 레이저를 제작하였으며 이 방법으로 0.095  $\mu\text{m}$  직경까지 제작이 가능하였던 실험을 이미 보고한 바 있다.<sup>(3)</sup> 그림 2는 H-D 구조를 가진 PQR 레이저의 전자현미경 사진이며, 그림 2(a)의 활성층 직경은 0.2  $\mu\text{m}$  이고, (b)의 활성층 직경은 1.0  $\mu\text{m}$  이다. (삽입된 그림은 활성층의 확대 사진이다.) 그림 2에서 보인 것처럼 H-D는 구조적으로 허리 부분은 매우 얇고 상대적으로 윗부분이 매우 넓기 때문에 sub-micrometer 활성층(허리 부분)과 소자 위 전극형성을 가능하게 한다. H-D 구조를 통해서 4.8, 4.0, 3.1, 3.0  $\mu\text{m}$ 과 sub-micrometer 인 1.0과 0.5  $\mu\text{m}$  활성층 직경을 가진 PQR 레이저를 제작하였다. 그림 3은 이 소자들의 측정된 스펙트럼이다.

주입전류는 600  $\mu$ A으로 일정하게 하였으며, 측정은 single mode fiber (SMF)를 이용하여 소자의 수직 방향에서 측정하였다.<sup>(2)</sup> 그림 3에서 볼 수 있듯이 직경이 4.8  $\mu$ m인 소자에서는 3개의 모드가 존재하는 것을 볼 수 있으며 활성층의 직경이 작아질수록 스펙트럼상의 두 번째 모드가 점점 작아지는 것을 볼 수 있으며, 1 과 0.5  $\mu$ m에서는 single mode만이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이론적인 single mode region인 900 nm에 매우 근접한 것을 볼 수 있다. 이론값과 측정된 값이 매우 근접하지만 100 nm 정도의 차이가 난다. 이렇게 1  $\mu$ m 부근에서 이미 single mode로 발진하는 것은 활성층의 직경이 작아질수록 모드간격이 증가함에 따라 (활성층 직경이 1  $\mu$ m인 경우 이론적으로 모드간격은 약 38 nm 정도) 두 번째 모드의 lasing을 위한 파장이 gain 영역을 벗어나게 되면서 single mode 발진만이 생존하는 것으로 해석된다.

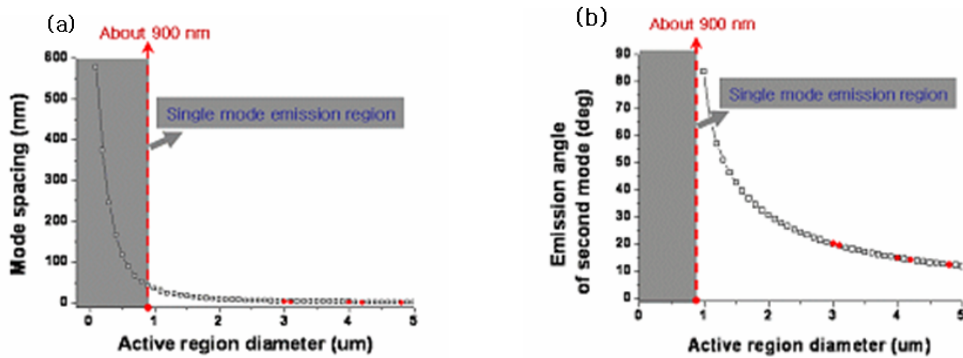


그림 1 . 활성층 직경에 따른 모드간격 (a)과 두 번째 모드의 emission angle (b) ( Red circles : 좌측부터 순서대로 4.8, 4.2, 4.0, 3.1, 그리고 3.0  $\mu$ m )

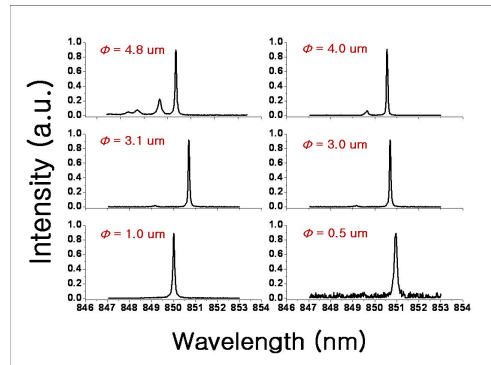
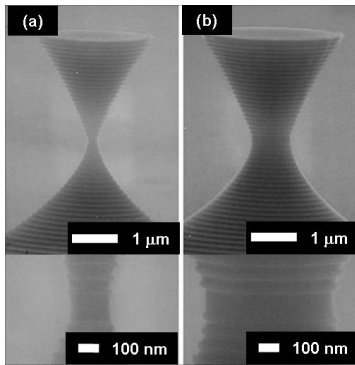


그림 2. H-D 구조 PQR 레이저의 전자현미경사진      그림 3. H-D 구조를 가진 PQR 레이저의 스펙트럼  
( 활성층 직경 : (a) = 200 nm, (b) = 1.0  $\mu$ m )

1. J.C. Ahn et al., "Photonic Quantum Ring", Phys. Rev. Lett. Vol. **82**, No.3 pp 536-539 (Jan. 1999).
2. Joongwoo Bae et al. "Spectrum of three-dimensional photonic quantum-ring microdisk cavities: comparison between theory and experiment", Opt. Lett. Vol. **28**, No. 20, pp 1861-1863 (Oct. 2003).
3. J. Y. Kim et al. "Fabrication of hyperboloid-drum structure for electrically pumped laser of sub micrometer to nanometer diameter active areas", J. Vac. Sci. Tech. B Vol. **22**, No. 2, pp. 673-677 (Mar. 2004)