

Spectral analysis of three-dimensional photonic quantum ring laser with equilateral triangle-shaped microcavity

김광해, 안성재, 윤준호, 이승은, 권오대
 포항공과대학교 전자전기공학과
 e-mail 주소 : jinzu@postech.ac.kr

PQR 레이저는 극소 구동 전류 및 온도 상승에 따른 파장의 안정 특성을 가지고 있어, 고집적 어레이 제작이 가능하여 차세대 디스플레이 소자, 광통신 및 광변조 기술의 핵심 소자로서의 잠재성을 보유하고 있다.^{1,2} 한편, 일반적인 정삼각형 마이크로 공진기는 직선 도파로 등과 evanescent wave 결합을 할 때, 상호 작용 거리가 매우 길어질 수 있어 광통신용 Add/Drop 필터, electrical-optical 변조 소자 등의 광소자 분야에 응용하려는 연구들이 진행되고 있다.³ 따라서 정삼각형 모양의 PQR 레이저는 앞서 언급한 PQR 레이저와 정삼각형 마이크로 공진기의 장점이 결합되어 광집적 회로의 응용에 중요할 것이다. 이에 본 연구에서는 정삼각형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드에 대하여 분석하였다.

정삼각형 toroidal PQR 레이저의 제작을 위해 사용한 에피는 MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) 방법으로 성장하였으며, 850 nm 발진을 위한 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ 구조의 세 개의 양자 우물과 다층 박막 구조의 DBRs (Distributed Bragg Reflectors) 반사판이 활성층을 아래위로 덮는 구조를 갖추고 있다. 정삼각형 toroidal PQR 레이저의 제작을 위하여 CAIBE (Chemically Assisted Ion Beam Etching)을 이용하여 정삼각형 모양으로 메사를 건식 식각하였다. 그리고 passivation을 위해 $SiNx$ 를 증착하고 절연과 평탄화를 위하여 폴리이미드를 코팅한 후, 위아래에 n-, p-electrode를 증착하였다.

그림 1은 정삼각형의 한 변의 길이 (L)이 25 μm 인 소자에 2.3 mA의 전류를 주입하면서 소자의 normal 방향에서 각도 10° (오른쪽)와 15° (왼쪽)에서 측정된 스펙트럼들이다. 각각의 스펙트럼은 수 nm 정도 폭의 envelope안에 여러 개의 뚜렷한 개별 모드들을 포함하고 있다. Envelope의 폭은 fiber-probe의 Numerical Aperture에 비례하여 달라질 수 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 측정 각도가 변화하여 각 스펙트럼의 envelope의 위치가 변화하더라도 envelope이 서로 겹치는 대역의 개별 모드는 측정 각도와 무관하게 서로 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 정삼각형 toroidal PQR 레이저의 emission은 emission wavelength와 angle에 quantization되어 있음을 의미하며, 발진 모드는 2차원 정삼각형 공진기에 대한 whispering-gallery 공진모드의 경계조건과 off-normal Fabry-Perot 공진 조건을 결합함으로써 다음 식과 같이 3차원 RFP (Rayleigh-Fabry-Perot) 공진기로 모델링할 수 있다.²

$$\lambda_m = \lambda_0 \frac{n_m}{n_0} \left[1 + \left(\frac{\lambda_0 m}{3Ln_0} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad \theta_m = \sin^{-1} \left[\frac{m}{3L} \cdot \lambda_0 \frac{n_m}{n_0} \left[1 + \left(\frac{\lambda_0 m}{3Ln_0} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right]$$

(λ_m : quantized wavelengths, θ_m : quantized emission angles, λ_0 : vertical emission의 wavelength, n_0 : λ_0 의 effective index, λ_m 의 effective refractive index)

그림 2(a)는 (L)이 25와 40 μm 각 소자의 emission 스펙트럼에서 측정된 emission wavelength (empty symbols)와 3차원 RFP 공진기 모델을 이용하여 계산한 emission wavelength (solid lines)이다. 그림에서 알 수 있듯이, 각각의 소자에서 측정된 데이터와 계산 값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 위 식에서 알 수 있듯이 수직 방향의 emission mode 근처는 mode의 밀도가 매우 높고 mode의 간격이 단파장으로 쪽으로 가면서(mode 차수가 증가 하면서) 점점 넓어지는 것을 알 수 있다. 또한, PQR 레이저는 3차원 RFP 공진기에서 발진하므로 각각의 발진 모드는 위 식에 의한 quantized된 emission angle

을 가지며, emission angle은 emission wavelength과 상호 밀접한 관계에 있음을 알 수 있다. 그림 2(b)는 (L)이 25와 40 μm 각 소자들의 emission 모드에 대한 emission angle를 나타낸다. Solid symbols들은 실제 측정된 wavelength에 의하여 구한 모드의 emission angle이고, solid lines들은 위 식을 이용하여 계산한 emission angle이다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 소자에서 두 종류의 데이터가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 스펙트럼상의 모드 간격과 마찬가지로 emission angle도 모드 차수에 대해 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 측정된 데이터로부터 구한 emission angle 변화율은 각각 25 μm 소자: 0.64°/mode, 40 μm 소자: 0.40 °/mode로 관찰되었다.

본 연구에서는 정삼각형 toroidal PQR레이저의 발진 모드들의 분석을 위하여 3차원 RFP 공진기모델링하였고, 측정된 emission wavelength과 angle은 이 모델과 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 모델은 PQR 레이저의 이산적인 다과장 emission angle 분포와 angle-wavelength 천이 관계를 잘 설명해 준다.

참고 문헌

1. J. C. Ahn, K. S. Kwak, B. H. Park, H. Y. Kang, J. Y. Kim, and O'Dae Kwon, Phys. Rev. Lett. **82**, 536 (1999); B. H. Park, S. D. Baek, J. Y. Kim, J. Bae, H. Han, and O'Dae Kwon, Opt. Eng. **41**, 1339 (2002).
2. B. H. Park, J. Bae, M. J. Kim, and O'Dae Kwon, Appl. Phys. Lett. **81**, 580 (2002); J. Bae, J. Lee, O'Dae Kwon, and V. G. Minogin, Opt. Lett. **26**, 632 (2001); S. J. An, J. Yoon, J. Lee, and O'Dae Kwon (in preparation).
3. R. J. Glauber and M. Lewenstein, Phys. Rev. Lett. A, **43**, 467 (1991).

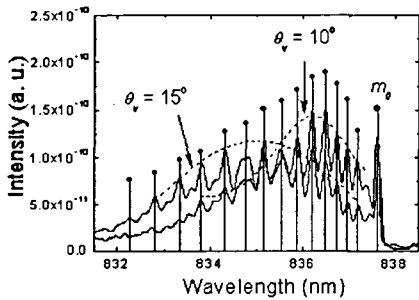


그림 1. (a) 정삼각형 toroidal PQR 레이저 및 angle-dependent 스펙트럼 측정 장치의 개략도(b)정삼각형의 변의 길이 (L)이 25 μm 인 소자에 2.3 mA의 전류를 주입하면서 normal 방향에서 각도 10° (오른쪽)와 15° (왼쪽)에서 측정된 스펙트럼.

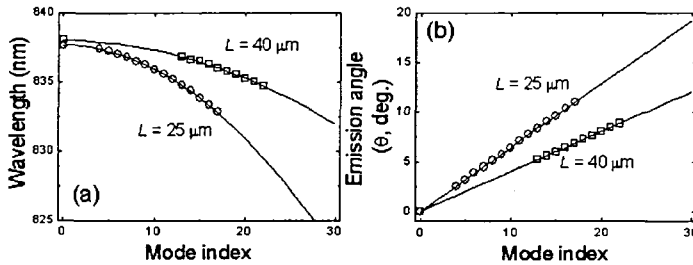


그림 2. (a) 각 모드에 대하여 실제 측정된 emission wavelength (empty symbols)와 3차원 RFP 공진기 모델에 의해 계산된 wavelength (solid lines)과 (b) 실제 측정된 wavelength에 의한 emission angle ((empty symbols)과 계산된 wavelength에 의한 emission angle (solid lines).