

# 정사각형 토로이드 광양자테 레이저의 스펙트럼 분석

## Spectral analysis of square toroidal PQR (Photonic Quantum Ring) laser

윤준호, 안성재, 김상겸, 이승은, 권오대  
 포항공과대학교 전자전기공학과  
 e-mail : odkwon@postech.ac.kr

PQR 레이저는 원대칭성에 의한 편광 부재, 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.<sup>1,2</sup> 한편, 일반적인 정사각형 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.<sup>3,4</sup> 따라서 정사각형 모양의 PQR 레이저는 앞서 언급한 PQR 레이저와 정사각형 마이크로 공진기의 장점이 결합되어 광집적 회로의 응용에 중요할 것이다. 이에 본 연구에서는 정사각형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드에 대하여 분석하였다.

정사각형 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. 정사각형 toroidal PQR 레이저의 제작을 위하여 CAIBE (Chemically Assisted Ion Beam Etching)을 이용하여 정사각형 모양으로 메사를 건식 식각하였다. 그리고 passivation을 위해  $SiNx$ 를 증착하고 절연과 평탄화를 위하여 폴리이미드를 코팅한 후, 위아래에 n-, p-electrode를 증착하였다.

정사각형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드는 정사각형 공진기에 대한 whispering-gallery 공진 모드의 경계조건과 off-normal Fabry-Perot 공진 조건을 결합함으로써 다음 식과 같이 3차원 RFP (Rayleigh-Fabry-Perot) 공진기로 모델링할 수 있다.

$$\lambda_{m_x, m_y} = \lambda_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_0}{2n} \right)^2 \left( \frac{m_x^2 + m_y^2}{a^2} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

(  $\lambda_{m_x, m_y}$  :  $m_x, m_y$  차 모드의 파장,  $\lambda_0$  : normal 모드의 파장, n : effective reflective index, a : 정사각형의 한 변의 길이)

이 때 2-D 방향인 정사각형 디스크의 경계면을 따라 매질과 공기 사이의 굴절률 차이에 의해 광파가 전반사 하면서 회전하는 whispering-gallery 공진 모드 조건만 고려하면, 정사각형 디스크에서는 45° 각도로 입사되는 모드들만이 closed-trip orbits를 가질 수 있다. 즉,  $m_x = m_y$ 인 모드들은 closed-trip orbits를 가지고,  $m_x \neq m_y$  모드들은 open-trip orbits를 가지게 된다.<sup>3,4</sup> 따라서 실제 emission 스펙트럼에서는  $m_x = m_y$ 인 모드들만이 나타나게 된다. 이러한 이유 때문에 정사각형 toroidal PQR 레이저에서는 원형 toroidal PQR 레이저에서 보다 발진 모드 간격이 넓어져 발진되는 모

드의 수도 더 작을 수 있다.

그림 1(a)는 한 변의 길이가  $20\ \mu\text{m}$ 인 정사각형 toroidal PQR 레이저에 대하여 위 식에 의해 계산된 공진 모드와 실제 측정된 발진 모드들을 보여 준다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 모델링한 식과 실제 측정된 data가 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 1(b)는 직경이  $20\ \mu\text{m}$ 인 원형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드이다.<sup>5</sup> 그림 1(a), (b)의 발진 모드들을 비교하면, 크기가 비슷한 경우 앞서 언급한 이유에 의하여 정사각형 구조가 보다 넓은 발진 모드 간격을 가져 보다 작은 수의 모드로 발진됨을 알 수 있다. 그러므로, 원형 구조보다 정사각형 toroidal PQR 레이저의 경우 단일 모드 발진이 더욱 용이하다.

일반적으로 공진기의 크기를 줄임으로써 단일 모드 발진을 얻을 수 있다. 그림 2(a)는 소자의 크기에 따른 정사각형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드 간격의 변화율을 보여준다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이, 소자의 크기가 작아짐에 따라 발진 모드 간격의 변화율이 증가하여  $6\ \mu\text{m}$  정사각형 소자의 경우, 변화율이  $0.62\ \text{nm}/\text{mode}$ 로 증가함을 알 수 있다. 그림 2(b)의  $6\ \mu\text{m}$  정사각형 toroidal PQR의 실제 발진 스펙트럼을 보면, 5 개의 모드들만이 발진함을 알 수 있다. 이를 통해 앞으로 소자 크기를 줄임으로써, 단일 모드로 발진하는 정사각형 toroidal PQR 레이저를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

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).
2. K. Lim, J. Kim, S. Kim, B. H. Park, O'Dae Kwon, ETRI Journal, (in print) February (2004).
3. A. W. Poon, F. Courvoisier, and R. K. Chang, Optics Lett. 26, 632 (2001).
4. H.-J. Moon, K. An, and J.-H. Lee, App. Phys. Lett. 82, 2963 (2003).
5. J. Bae, J. Lee, V. G. Minogin, and O'Dae Kwon, Optics Lett. 28, 1861 (2003).

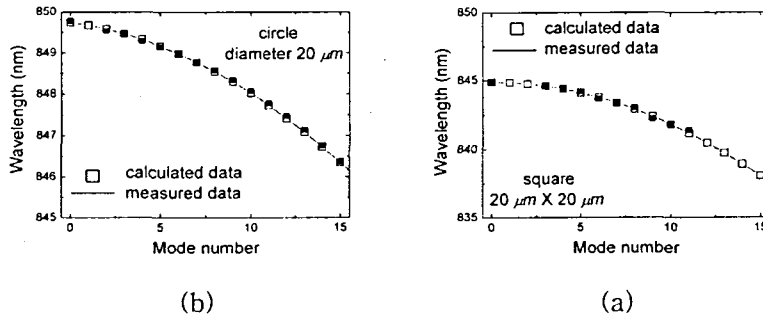


그림 1. (a)  $20\ \mu\text{m}$  정사각형과 (b) 직경  $20\ \mu\text{m}$  원형 toroidal PQR 레이저의 발진 모드

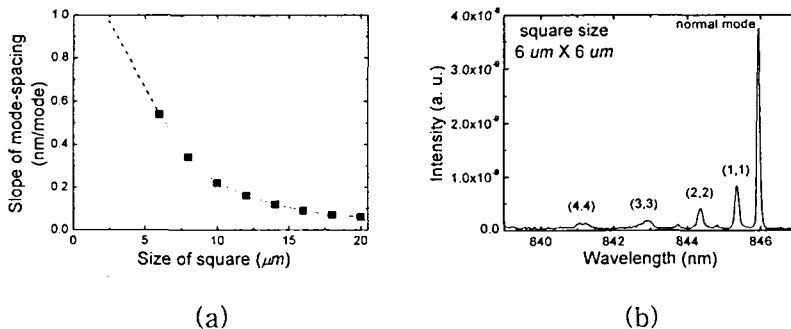


그림 2. (a) 정사각형 크기에 따른 발진 모드 간격의 변화율과 (b)  $6\ \mu\text{m}$  정사각형 toroidal PQR 레이저의 스펙트럼

