

두층 사각 구조 미소공진기 레이저에서의 공간 모드 선택 구도 연구

Study on the Spatial Mode Selection in a Layered Square Microcavity Laser

문희중, 박건우, 이상범*, 안경원*, 이재형*
 세종대학교 광공학과, *서울대학교 물리학과
hjmoon@sejong.ac.kr

원형 미소공진기는 Q값이 매우 큰 공진모드가 존재할 수 있어, 광집적회로 등의 초저문턱 미소공진기 레이저에 적용되는 연구가 활발하게 수행되고 있고, 광통신용 Add/Drop Filter, 전-광 (electrical to optical) 직접 변환소자 등의 광소자 분야에 활용하려는 연구가 진행되고 있다.

한편 미소공진기 연구는 원형에서 더 나아가 square, quadrupole, spiral, mismatched two cavities 등으로 확장되고 있다.⁽¹⁾ 이 중 정사각형(square) 구조는 분석하기가 쉽고, waveguide 등과 표면감쇠파 (evanescent wave) 결합할 때 상호작용 거리(interaction length)가 매우 길어질 수 있어, 최근 주목받고 있다.⁽²⁾ 본 연구에서는 굴절율이 서로 다른 두층 구조의 정사각형 미소공진기 레이저에서도, 주기적인 피크 형태로 레이저가 발진됨을 실증하였고, 굴절율 변화에 따른 발진 모드의 변화를 측정하여 발진 모드가 단일 공간모드(single spatial mode)임을 확인하였다.

그림 1은 사용된 두층 구조 정사각형 미소공진기 형태가 나타나 있다. $d_1 = 300 \mu\text{m}$ (굴절율 $m_1 = 1.458$), $d_2 = 100 \mu\text{m}$ 인 속이 빈 정사각형 fused-silica capillary (Polymicro Technology Inc.)에 Rh6G 색소가 1 mM/L 농도로 첨가된 ethylene glycol ($m_2 = 1.432$)을 흘려 미소공진기로 사용하였다. fused-silica 외부층의 사각 경계면은 Capillary 제작상 rounding 되어 있다. Nd:YAG 제 2조화파 (532 nm) 레이저 펄스를 여기광으로 사용하였고, PDA(photo diode array)가 장착된 spectrometer로 레이저 스펙트럼을 검출하였다.⁽³⁾ 그림 1에는 두층 구조가 아니고 단일 정사각형 공진기에 존재할 수 있는 다양한 모드에 해당하는 ray가 나타나 있다. 경계면에서의 입사각 θ 가 45° 인 경우에는 closed loop를 형성하나, $\theta \neq 45^\circ$ 인 경우에는 open loop를 형성한다.

그림 2는 대표적인 레이징 스펙트럼을 보여주고 있다. 모드 간격이 일정한 (0.25 nm) 주기적인 피크들이 검출되었다. 그림 2의 모드 간격은 그림 1의 단일 정사각형 공진기 모드의 모드 간격과 같음을 알 수 있다. 즉 그림 1에서 입사각 θ 의 open loop ray의 optical round trip length L 은 $L = 2m_2d_1(\cos\theta + \sin\theta)$ 와 같이 표현되고, $L = (n_x + n_y)\lambda$ 을 만족하는 λ 간격은 θ 가 45° 근처에서 대략 0.25 nm로 관측 결과와 일치한다.

레이징이 발생하려면 단일 정사각형 공진기 모드가 내부의 이득 매질을 통과하여야 한다. 그림 1의 open loop ray는 여러 번 돌면서 내부 사각형의 이득 매질과 만나게 된다. 이 때, 이득 매질을 통과하여 다시 외부층으로 나올 때의 투과각은 입사각과 같아야만 다시 같은 optical round trip length를 겪게 된다. 이러한 조건은 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 내부 사각형에서 입사각 및 투과각이 45° 일 때에만 만족되며, 입사각 θ 는 $\theta = \sin^{-1}(m_1/\sqrt{2}m_2)$ 로 unique 하게 주어짐을 알 수 있다.

주어진 굴절을 m_2 에 대해 내부 액체층의 굴절을 m_1 을 변화시키면, 레이징 가능한 입사각 θ 가 달라지므로 L 이 변하게 되고, 따라서 레이징 피크의 위치가 변함을 알 수 있다. Ethylene Glycol에 ethanol을 섞어 굴절을 m_1 을 변화시키면서 측정된 피크의 청색 천이 정도가 그림 4에 나타나 있다. 측정값과 앞의 논의에서 도출된 이론값이 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 두 층 구조 사각 공진기에서의 레이징 모드는 여러 open loop ray들 중, 내부층에서의 입사각 및 투과각이 45° 로 결정되는 입사각을 갖는 특정 open loop ray 혹은 단일 공간모드만이 발진됨을 의미한다.

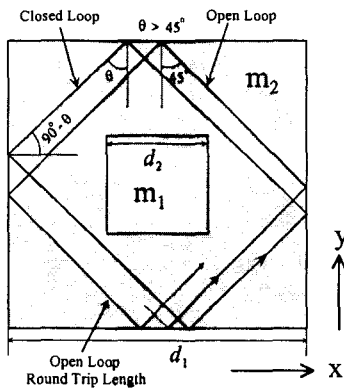


그림 1. 두층 정사각 공진기

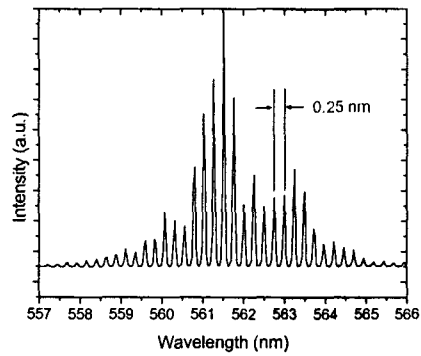


그림 2. 대표적인 레이징 스펙트럼

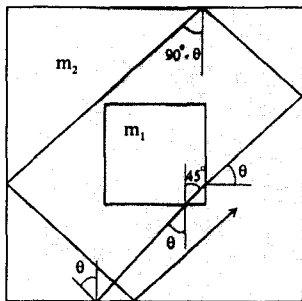


그림 3. 레이징 ray

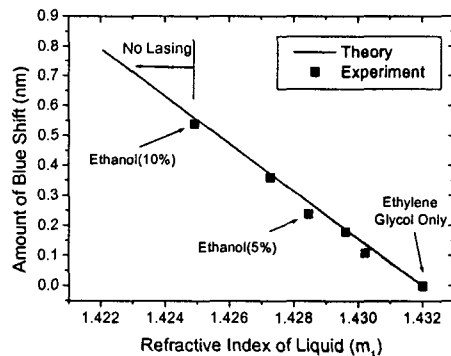


그림 4. 스펙트럼 변화

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2002-000-00019-0(2002)) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) G. D. Chern et al., "Directional laser emission from square, spiral and mismatched semi-circular dye-doped polymer based micropillar cavities" QELS2002 Tech. Digest, 25 (2002).
- (2) A. W. Poon, F. Courvoisier, R. K. Chang, "Multimode resonances in square-shaped optical microcavities", Opt. Lett. 26, 632 (2001).
- (3) H. J. Moon, K. An, " Interferential coupling effect on the whispering-gallery mode lasing in a double-layered microcylinder", Appl. Phys. Lett. 80, 3250 (2002).