

# Evanescent Wave를 매개로 이득을 얻는 실린더형 Micro-Cavity Laser

## Cylindrical Micro-Cavity Laser based on the Gain through the Evanescent Wave

문희중, 조영탁, 김중복, 안경원

거시양자광 레이저 연구단, 한국과학기술원, 대전 305-701

hjmoon@cais.kaist.ac.kr

굴절율이 외부보다 큰 원통 (cylinder)이나 구 (sphere)는 경계면에서의 전반사에 의해 손실이 매우 적은 high-Q cavity가 될 수 있음이 잘 알려져 있다. 크기가 수 십  $\mu\text{m}$  되는 원통형 실린더나 구에서의 공명모드는 편광 (TM, TE), 모드 수 (mode number)  $n$ , 모드 순서 (mode order)  $l$ 에 의해 정의되고 WGM (whispering gallery mode)라고도 불리워진다<sup>(1)</sup>. 모드 수  $n$ 이 클수록 모드 순서  $l$ 이 작을수록 공명모드의 Q 값은 큰 경향을 가진다. 액체 방울이나 액체 제트와 같이 열적 섭동에 민감한 micro-cavity의 경우 Q값이  $10^7$  정도로 제약되나, 실리카 microsphere와 같은 고체 구에서 측정된 Q값은 약  $10^{10}$  정도로 손실이 매우 적은 microcavity가 가능한 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 이와 같은 microcavity 특성을 이용하여 다양한 형태의 micro-cavity laser에 대한 연구가 진행되어 왔다. 색소가 첨가된 고체구, 액체 방울, 액체 제트 등에서 기본적인 실험이 이루어졌고 반도체 microsphere 구조에서 WGM laser<sup>(3)</sup>, polymer disc laser<sup>(4)</sup>, photonic quantum ring<sup>(5)</sup> 특성 연구 등이 실용가능성을 목표로 진행되고 있다.

위에서 살펴본 연구는 이득 (gain) 매질이 micro-cavity 내부에 있을 때의 lasing 발생에 관한 연구임에 비해 최근 이득을 낼 수 있는 형광 분자나 단일 양자 구슬(Quantum Dot)이 micro-cavity 외부에 존재할 때의 lasing 발생에 대한 이론적 고찰이 보고되고 있다<sup>(6)</sup>. 이는 WGM 모드 분포가 cavity 외부에도 evanescent wave 형태로 존재하기에 가능하다. 색소와 같은 형광분자나 반도체 양자 우물 (Quantum Well)이 cavity 외부에서 evanescent wave와 결합하여 luminescence spectrum 변화<sup>(7)</sup>와 같은 Cavity QED 효과에 대한 연구는 실험적으로 확인된 바 있다. Micro-cavity 외부에 있는 형광 분자가 WGM 모드의 evanescent wave와 결합하여 이득을 발생시키는 evanescent wave laser에 대한 실험적 연구는 아직 보고된 바 없다. 본 연구에서는 실린더형 micro-cavity 외부에 존재하는 색소가 WGM 모드의 evanescent wave와 결합하여 레이징이 발생됨을 실험적으로 확인하고 그 특성을 조사하였다.

실험 장치의 간략한 모습이 그림 1에 나타나 있다. 속이 빈 실리카 유리관 (내경  $200 \mu\text{m}$ , Polymicro Technology Inc.)을 통해 색소 Rh6G가 2 mM/L로 용해된 에탄올 (굴절율  $m_1 = 1.361$ ) 액체가 흐르도록 하였다<sup>(8)</sup>. Clad 직경이  $125 \mu\text{m}$ 인 실리카 광섬유 ( $m_2 = 1.458$  at  $\lambda = 600 \text{ nm}$ )를 유리관에 넣어 micro-cavity로 사용하였다. 굴절율 비  $m_2/m_1$ 는 1.0713으로 선택된 광섬유 크기에서 다양한 WGM 모드가 존재함을 계산할 수 있다. 계산 결과 이상적인 실린더형 cavity의 경우,  $l = 1, 2, 3, 4$ 인 WGM 모드의 Q값은 약  $4 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^5$ ,  $1 \times 10^4$ 이다. 여기광으로는 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저 (파장 532 nm, 펄스폭 5 ns)를 15 cm렌즈로 집속하여 사용하였고 다이오드 어레이가 장착된 분광기로 스펙트럼을 측정하였다. 칼라 필터가 장착된 현미경을 통해 광섬유에서 레이징되는 모습이 그림 2에 나타나 있다. 광섬유 경계 부분이 밝게 나타나 있음을 보아 evanescent wave에 의한

---

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업과 정보통신부 대학기초연구사업의 지원을 받았다.

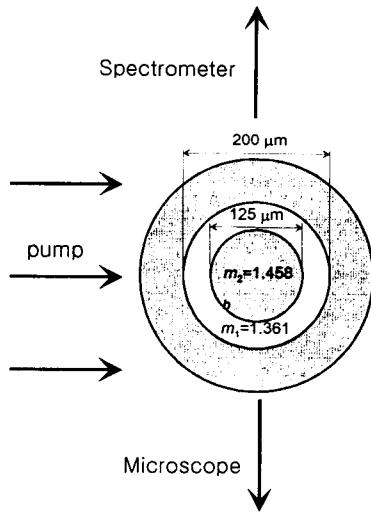


그림 1. 실험 장치



그림 2. 광섬유에서 레이징되는 모습

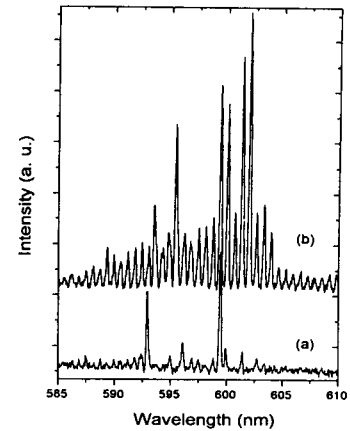


그림 3. 레이징 스펙트럼

레이징이 발생함을 알 수 있다.

그림 3에 단일 여기펄스에 의한 대표적인 신호광의 스펙트럼이 나타나 있다. 펄스 에너지가 약 0.2 mJ로 문턱 조건을 넘었을 때 (a)에 나타나 있는 바와 같이 두 개의 레이징 peak가 주도적으로 발진된다. 600 nm 근처의 peak는  $TM$  모드, 그 왼쪽의 강한 peak는  $TE$  모드임을 확인하였다. 펄스 에너지를 3 mJ로 증가시키면 (b)에 나타난 바와 같이 여러개의 peak들이 이득을 얻어 발진된다. 모드 간격은 약 0.6 nm로 125  $\mu\text{m}$  실린더에서의 WGM 모드 간격과 일치하였다. 이로부터 그림 2에 나타난 밝은 rim 부분은 evanescent wave에 의한 레이저 빛이 외부로 누설되는 모습을 확인할 수 있다. 600 nm 보다 장파장쪽에 나타난 WGM peak 들은 Q값이  $10^8$  정도로 매우 큰  $l = 2$ 인 모드들임을 액체 시료의 흡수 스펙트럼으로부터 추정할 수 있다. WGM 모드 볼륨 중 evanescent wave가 차지하는 비율을 계산하고, Fabry-Ferot 레이저 모델로부터 측정된 레이징 스펙트럼을 분석하였다. 본 연구에서 보인 evanescent wave에 의한 레이저 발진 실험은 소수의 양자 구슬이나 원자들이 Q값이 매우 큰 micro-cavity 외부에 존재할 때 발생하는 양자광 레이저<sup>(9)</sup>의 구현 가능성을 제시한다.

## 참고문헌

1. P. W. Barber and S. C. Hill, *Light Scattering by Particles: Computational Methods* (World Scientific, 1990).
2. M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov and V. S. Ilchenko, *Opt. Lett.* **21**, 453(1996).
3. M. Nagai, F. Hoshino, S. Yamamoto, R. Shimano, M. K. Gonokami, *Opt. Lett.* **22**, 1630(1997).
4. M. K. Gonokami *et al.*, *Opt. Lett.* **20**, 2093(1995).
5. J. C. Ahn, K. W. Kwan, B. H. Park, H. Y. Kang, J. Y. Kim, O'Dae Kwon, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 536(1999).
6. M. Pelton and Y. Yamamoto, *Phys. Rev. A.* **59**, 2418(1999).
7. X. Fan, A. Doran and H. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3190(1998).
8. H. J. Moon, J. H. Yi, J. T. Kim and J. M. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, L377(1999).
9. K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari and M. S. Feld, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3375 (1994).