

High-Q 마이크로스피어에서의 표면감쇠파 결합 레이저

Evanescent Wave Coupled Laser in High-Q Microspheres

최용석, 안경원, 문희중*

한국과학기술원 물리학과 거시양자광레이저연구단, *한국원자력연구소

yschoi@cais.kaist.ac.kr

굴절율이 외부보다 큰 실린더 (cylinder)나 스피어 (sphere)는 경계면에서의 전반사에 의해 손실이 매우 적은 high-Q 공진기가 될 수 있음이 잘 알려져 있다. 크기가 수 십 μm 되는 실린더나 스피어에서의 공명모드는 편광 (TM , TE), 모드 수 (mode number) n , 모드 순서 (mode order) l 에 의해 정의되고 WGM (whispering gallery mode)라고도 불리워진다⁽¹⁾. 모드 수 n 이 클수록 모드 순서 l 이 작을수록 공명모드의 Q 값은 큰 경향을 가진다. 액체 방울이나 액체 제트와 같이 열적 섭동에 민감한 마이크로 공진기 (micro-cavity)의 경우 Q값이 10^7 정도로 제약되나, 실리카 마이크로 스피어 (micro-sphere)와 같은 고체 구에서 측정된 Q값은 약 10^{10} 정도로 손실이 매우 적은 공진기가 될 수 있다⁽²⁾. 이와 같은 마이크로 공진기 특성을 이용하여 다양한 형태의 마이크로 공진기 레이저 대한 연구가 진행되어 왔다. 색소가 첨가된 고체구, 액체 방울, 액체 제트 등에서 기본적인 실험이 이루어졌고 반도체 마이크로 스피어 구조에서 WGM 레이저⁽³⁾, polymer disc laser⁽⁴⁾, 광양자테 (photonic quantum ring)⁽⁵⁾ 특성 연구 등이 실용가능성을 목표로 진행되고 있다.

최근 이득을 낼 수 있는 형광 분자나 단일 양자 구슬 (Quantum Dot)이 마이크로 공진기 (micro-cavity) 외부에 존재할 때의 레이징 (lasing)발생에 대한 이론적 고찰⁽⁶⁾이 보고되었다. 또한 형광 물질인 색소 분자가 마이크로 공진기의 외부에서 표면감쇠파 (evanescent wave)와 결합하여 레이징을 일으키는 것을 실험적으로 확인한 연구 결과⁽⁷⁾⁽⁸⁾들도 보고되고 있다. 이는 기존의 레이저에서 이득 매질이 공진기 내부에 존재하는 것과 달리 외부에 존재한다는 점에서 새로운 응용성을 제시한다. 본 연구에서는 높은 Q 값을 가진 실리카 마이크로 스피어 외부에 존재하는 색소가 WGM 모드의 표면감쇠파와 결합하여 레이징이 발생하는 것을 실험적으로 확인하고 그 특성을 조사하였다.

실험 장치는 그림 1과 같다. 속이 빈 실리카 유리관 (내경 $200 \mu\text{m}$, Polymicro Technology Inc.) 내부에 스피어를 넣고 색소 Rh6G가 0.05 mM/L로 용해된 에탄올 (굴절율 $m_1 = 1.361$) 액체가 흐르도록 하였다⁽⁹⁾. 스피어의 크기는 약 $130 \mu\text{m}$ 인데, 코어의 직경이 $100 \mu\text{m}$ 인 실리카 광섬유 ($m_2 = 1.458$ at $\lambda = 600 \text{ nm}$)를 불산 (HF 50%) 으로 약 30분간 에칭시켜 가늘게 만든 후 끝 부분을 CO_2 레이저 (cw, 20W)로 용융시켜 제작하였다. 여기광으로는 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저 (파장 532 nm, 펄스폭 4.5 ns)를 10 cm렌즈로 집속하여 사용하였고 다이오드 어레이가 장착된 분광기로 스펙트럼을 측정하였다. 칼라 필터가 장착된 현미경을 통해 촬영한 레이징 모습이 그림 2에 나타나 있다. 구의 경계 부분이 밝게 나타나 있음을 보아 표면감쇠파에 의한 레이징이 발생함을 알 수 있다. 마이크로 스피어를 실리카 유리관 내벽에 붙인 경우 WGM이 훼손되므로 구의 경계부분이 어두워지고 그에 따른 발진되는 스펙트럼의 변화도 분광기로 확인할 수 있었다.

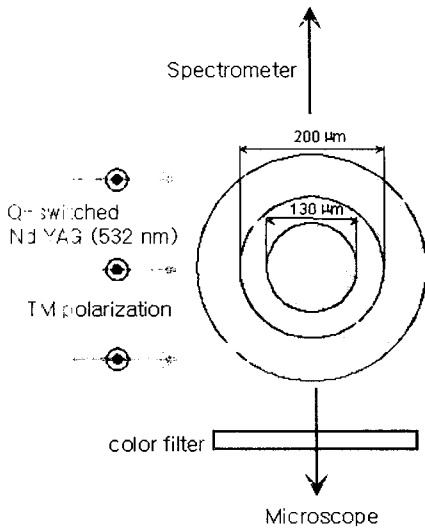


그림 1. 실험장치

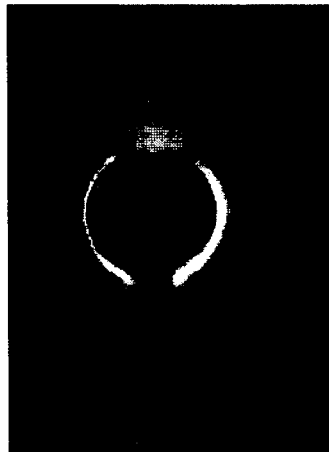


그림 2. 레이징 이미지

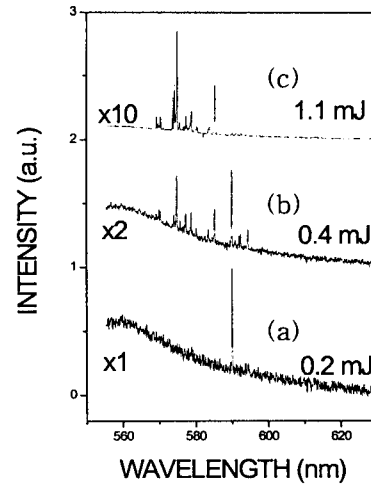


그림 3. 레이징 스펙트럼

그림 3에 단일 여기펄스에 의한 대표적인 신호광의 스펙트럼이 나타나 있다. 펄스 에너지가 약 0.2 mJ로 문턱 조건을 넘었을 때 그림 (a)에 나타나 있는 바와 같이 590nm에서 한 개의 레이징 피크가 발진된다. 펄스 에너지를 증가시키기에 따라 그림 (b), (c)와 같이 단파장쪽의 WGM 모드들도 이득을 얻어 발진됨을 볼 수 있다. 편광자를 이용하여 TM 모드의 스펙트럼을 측정하여 모드 간격을 확인한 결과 0.67nm 였으며 이는 발진 파장 (590nm)과 스피어의 크기 (130 μm)를 이용해 이론적으로 계산한 모드 간격 0.63nm 와 거의 일치하였다. 590 nm 근방의 피크들은 Q값이 10^8 정도로 매우 큰 모드들임을 액체 시료의 흡수 스펙트럼으로부터 추정할 수 있다. WGM 모드 볼륨 중 표면감쇠파가 차지하는 비율을 계산하고, Fabry-Ferot 레이저 모델로부터 추정된 레이징 스펙트럼을 분석하였다. 본 연구에서 보인 표면감쇠파 결합에 의한 레이저 발진 실험은 소수의 양자 구슬이나 원자와 높은 Q값의 마이크로 공진기를 이용한 실용적인 양자광 레이저⁽¹⁰⁾ 및 양자 컴퓨터⁽¹¹⁾를 구현할 수 있는 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. 문희중, 조영탁, 김중복, 안경원, *새물리*, **40**, 198 (1999)
8. Fujiwara H, Sasaki K, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1 38**: (9A), 5101 (1999)
9. H. J. Moon, J. H. Yi, J. T. Kim and J. M. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, L377 (1999)
10. K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari and M. S. Feld, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3375 (1994).
11. T. A. Brun, H. Wang, *Phys. Rev. A.* **61**, 032307 (2000)