

초고품질 마이크로스피어 레이저의 발전 특성 연구

Study on the characteristics of an ultrahigh-Q microsphere laser

최용석, 문희중*, 안경원

한국과학기술원 물리학과 거시양자광레이저연구단, 대전 305-701

* 한국원자력연구소, 양자광학기술개발팀, 대전 305-600

yschoi@cais.kaist.ac.kr

실리카 마이크로 스피어는 손실이 대단히 적은 초고품질 공진기로 알려져 있다. 최근의 실험들에 의하면 실리카 마이크로 스피어는 공진기 Q 값이 10^9-10^{10} 정도인데⁽¹⁾, 이는 현재까지 만들어진 마이크로 공진기들 중에서 가장 높은 값이다. 최근 마이크로 스피어는 저손실의 공진기로서 문턱조건이 없는 레이저 연구에 활용되고 있으며⁽²⁾, 레이저와 좁은 공명 모드 선폴을 이용하여 레이저 주파수 안정화⁽³⁾ 및 광섬유 결합기⁽⁴⁾ 등에 등에 활용되고 있다. 또한 Cavity-QED 연구와 Cavity-QED 효과를 이용한 소수의 양자점 레이저⁽⁵⁾ 연구에도 활용되고 있다⁽⁶⁾. 그러나 이렇게 높은 Q 값을 손상시키지 않으면서 능동 광소자로 활용할 수 있는 적절한 실험 방법이 개발되지 않은 상태이다. 이러한 이유로 제작 직후 프리즘과 결합시켜 Q 값을 측정하는 경우를 제외하고는 대부분의 실험에서 Q 값은 수 백~수 천배 정도 낮은 것으로 보고되고 있다. 최근 본 연구단에서는 이득을 낼 수 있는 색소 분자가 실린더형 마이크로 공진기 외부에서 표면감쇠파 (evanescent wave) 와 결합하여 레이징을 일으키는 것을 실험적으로 확인한 연구 결과를 보고한바 있다⁽⁷⁾. 이러한 연구결과는 기존의 레이저에서 이득 매질이 공진기 내부에 존재하는 것과 달리 외부에 존재한다는 점에서 새로운 응용가능성을 제시한다. 이러한 선행연구를 바탕으로 본 연구에서는 표면감쇠파 결합을 이용하여 ultrahigh-Q 마이크로 스피어 레이저를 실현시켰으며 발전되는 공명모드의 Q 값이 $2.3(1.0) \times 10^9$ 임을 확인하였다.

실험에서 레이저로 사용된 미세 공진기는 지름이 $111(1) \mu\text{m}$ 인 실리카 마이크로 스피어이며, 굵기가 $20 \mu\text{m}$ 인 광섬유 ($m_2 = 1.471$) 의 끝부분을 CO₂ 레이저로 용융시켜 제작하였다. 이득 매질로는 Rhodamine 6G를 에탄올 ($m_1 = 1.361$)에 녹인 용액을 사용하였다. 레이저의 구조는 참고문헌(7)과 같이 이득매질이 미세공진기 외부에 존재하며 발진을 위한 이득은 표면감쇠파 결합으로부터 얻어진다. 여기광으로 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저 (파장 532 nm, 펄스폭 10 ns)를 사용하였고, 레이징 스펙트럼은 다이오드어레이가 장착된 분광기로 측정하였다. 여기광의 크기는 지름이 대략 $200 \mu\text{m}$ 이었으며 미세 공진기 주위에 있는 이득 매질들을 모두 여기시켰다.

그림 1은 대표적인 레이징 모습을 촬영한 사진이다. 그림 1(a)는 이득매질의 농도가 2 mM/L인 경우이며 미세 공진기 테두리에서 접선방향으로 누설되는 WGM 레이징을 관찰할 수 있다. 미세 공진기 위쪽에 밝게 보이는 선은

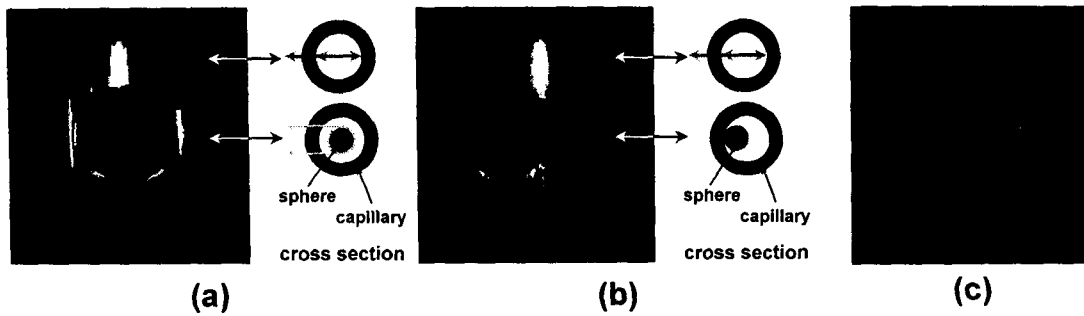


그림 1. 표면감쇠와 결합에 의한 고품위 구형 미세공진기 레이저의 발진 모습

이득 매질이 담긴 유리관이 공진기 역할을 하여 발진되는 레이징 모드인데 미세 공진기에 비해 품질값이 낮으므로 적색의 WGM 레이징 빛과는 다른 녹색의 빛을 방출하게 된다. 이는 이득 매질의 방출 단면적이 적색보다는 녹색의 표장영역에서 더 크기 때문에 저품질 공진기의 경우 이득을 얻기 쉬운 녹색에서 발진하기 때문이다. 이러한 레이저 광들은 여기광과 함께 이득 매질의 형광을 유발한다. 그림 1(b)는 미세공진기가 유리관 내벽에 닿은 경우에 관찰되는 모습으로 공진기 테두리에 존재하는 WGM 레이징은 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 접촉에 의해 WGM 공명모드의 품질값이 감소되기 때문인데 접촉이 일어난 적도근방 뿐만 아니라 다른 대부분의 영역에서도 WGM 레이징이 사라진다. 그림 1(c)는 이득 매질의 농도를 0.05 mM/L까지 낮추었을 때의 발진되는 모습으로 오직 WGM 레이징만 관찰할 수 있었다. 이 경우, 색소 분자수가 적으므로 저품질의 공진기인 유리관에서는 발진에 필요한 이득보다 손실이 커서 문턱 조건을 넘을 수 없는 반면 고품위의 미세 공진기인 마이크로스피어는 여전히 문턱 조건을 넘게 되므로 발진할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 고품위 구형 미세 공진기 레이저의 발진특성을 연구하였으며 그 결과 발진되는 공명모드의 품질값이 $2.3(1) \times 10^9$ 임을 확인하였다. 고품위의 미세공진기는 소수의 양자점이나 원자 등을 이용한 Cavity-QED 연구나 양자광원소자 개발에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov, and V. S. Ilchenko, *Opt. Lett.* **21**, 453 (1996).
2. W. von Klitzing, E. Jahier, R. Long, F. Lissillour, L. Lefevre-Seguin, J. Hare, J.-M. Raimond, and S. Haroche, *Electron. Lett.* **35**, 1745 (1999)
3. S. Schiller and R. L. Byer, *Opt. Lett.* **16**, 1138 (1991).
4. M. Cai, O. Painter and K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 74, (2000).
5. D. W. Vernooy, A. Furusawa, N. Ph. Georgiades, V. S. Ilchenko, and H. J. Kimble, *Phys. Rev. A.* **57** R2293 (1998).
6. M. Pelton and Y. Yamamoto, *Phys. Rev. A.* **59**, 2418 (1998).
7. H.-J. Moon, Y.-T. Chough, and K. An, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3161 (2000).