

표면 감쇠파 이득에 기초한 초고품질 원통형 및 구형 미소 공진기 레이저

Ultrahigh Q cylindrical and spherical microcavity lasers based on evanescent-wave-coupled gain

안경원

한국과학기술원 물리학과 및 거시 양자광 레이저 연구단

kwan@mail.kaist.ac.kr

반도체에서 소자의 크기를 작게 하고 집적도를 높임으로서 성능과 효율을 증가시키는 노력이 계속되듯이 광소자의 경우에도 고효율을 갖는 아주 작은 크기의 발광소자를 만들어서 광정보처리에 이용하려는 노력이 진행중이다. 특히 마이크로 크기의 공진기와 이득물질간의 광결합 효율이 높으면 레이저 발진 문턱이 낮아진다는 원리를 이용한 마이크로 레이저 연구가 활발하다. 이러한 마이크로 레이저의 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행된다. 하나는 응용성에 초점을 맞추어 이득물질과 공진기의 결합체를 반도체 공정을 통해 마이크로 크기로 제작하여 둘 사이의 결합효율을 높이는 방향이고, 다른 하나는 광손실이 극도로 작은 미소 공진기와 발광효율이 높은 원자, 분자, 또는 극저온 상태의 양자점 등을 결합시켜 원리 탐구에 초점을 맞추는 방향이다. 본 연구는 후자에 속한다.

마이크로 스피어나 마이크로 실린더와 같은 구형 공진기에서는 공진기 내부에서 전반사에 의해 광선이 갇히는 현상 때문에 공진기 경계면 근처에 손실이 극도로 작은 공진기 모드가 존재한다. 이러한 모드를 "속삭이는 회랑 모드" (whispering gallery mode, WGM)라고 하는데 직경이 수십 마이크로 정도 인 실리카 마이크로 스피어의 경우 공진모드의 품질값 Q 는 10^{10} 정도에 이른다. 참고로 비슷한 크기의 레이저 다이오드의 Q 값은 10^5 에 불과하다. 그 외에도 WGM는 모드의 부피가 다른 공진기 보다 무척 작기 때문에 이득 물질과 강하게 작용한다는 장점도 갖는다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 마이크로 스피어 안에 이득물질을 첨가하여 레이저 발진을 시키면 Q 값은 10^7 정도로 감소하고 만다. WGM들이 공진기 내부에 존재하므로 이득물질도 공진기 내부에 있어야 하고 레이저 발진을 위해 이득물질을 광 또는 전기적인 방법으로 흥분시키면 열 효과 등에 의해 공진기 굴절률이 바뀌면서 Q 값의 감소를 초래하는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 공진기 바깥에 미약하나마 존재하는 WGM의 표면감쇠파 (evanescent wave)를 이용하는 방안이 거론되어왔다. 즉 공진기 바깥에 이득물질을 두고 표면감쇠파와의 결합을 이용하여 공진기 내부의 WGM을 흥분시킨다는 것인데 이러한 방식으로 마이크로 레이저를 구동한 적은 아직까지 없었다. 본 연구에서는 표면감쇠파 아이디어가 유효하다는 것을 마이크로 실린더를 이용한 실험을 통해 처음으로 입증하였으며,⁽¹⁾ 최근 마이크로 스피어를 이용한 레이저 실험에서는 5×10^9 정도로 아주 높은 Q 값을 관측할 수 있었다.

본 연구에서는 우선 흔히 구할 수 있는 지름이 $125 \mu\text{m}$ 정도의 광섬유를 마이크로 공진기로 하고 그 바깥에 색소 Rh6G 분자가 첨가된 에탄올 액체를 놓아 이득물질로 이용하는 마이크로 실린더 레이저

를 연구하였다. 구체적으로 실리카 모세관 (내경 $200\ \mu\text{m}$)의 중앙에 광섬유를 넣고 그 사이에 에탄올 액체를 흘리는 방식을 취하였으며 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파로 광펌핑을 하였다. 발진되는 레이저 빛의 스펙트럼을 측정하면 일정한 간격을 갖고 좁은 봉우리들이 군(group)의 형태로 나타났다. 이들에 대해 여기광의 세기를 바꿔가면서 문턱 특성이 나타남을 관측하였으며, 스펙트럼에서 봉우리 사이의 간격이 실험에 사용한 실린더형 공진기가 갖는 WGM의 종모드 간격과 일치함을 확인하였다. 발진된 레이저의 스펙트럼을 설명하기 위해 표면감쇠파 결합을 통해 이득을 얻는 미소공진기 레이저에 관한 모델을 설정하였다. 이득은 표면감쇠파 영역에서만 얻을 수 있으므로 전체 WGM에서 표면감쇠파 영역이 차지하는 부피 비율을 반영하여 레이저 발진 조건을 구하면 레이저 발진에 필요한 최소한의 밀도반전을 파장의 함수로 도출할 수 있다. 이러한 분석을 통해 실험에서 관측한 WGM들의 모드 순서 ν 와 Q 값을 결정할 수 있었는데 모드 순서 $\nu=2$ 의 Q 값은 약 3×10^7 정도였으며 이보다 Q 값이 큰 $\nu=1$ 모드는 관측되지 않았다. 또 특정 여기광의 위치에서는 광섬유 표면 거칠기에 의한 특정 모드의 선택적 증폭으로 설명되는 단일모드 발진도 관측할 수 있었다.

광섬유 피복을 벗겨내서 사용한 마이크로 실린더의 실험에서 도달할 수 있는 유효 Q 값은 약 10^7 정도가 최대인 반면에 마이크로 스피어의 경우 기본 Q 값이 워낙 높기 때문에 표면감쇠파를 이용한 다면 아주 높은 Q 를 갖는 마이크로 레이저를 얻을 수 있다고 예측할 수 있다. 본 연구에서는 CO_2 레이저를 이용하여 지름이 100 마이크로 정도인 실리카 마이크로 스피어를 직접 제작하고 (그림 1) Rh6G 색소 분자가 첨가된 에탄올 액체를 이득 물질로 하여 표면감쇠파와의 결합에 의한 레이저 발진을 시도하였다. 색소의 농도는 $0.0125\ \text{mM/L}$ 로 마이크로 실린더의 경우보다 160배 낮았으나 높은 Q 값으로 인하여 WGM의 레이저 발진이 관측되었다. 펌프광은 펄스폭이 10 ns 정도인 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파로 펄스 당 에너지가 $200\ \mu\text{J}$ 였으며 마이크로 스피어의 적도 부근에 있는 색소 원자들만을 흥분시키기 위하여 원통 렌즈로 적도 부근에 집속되었다. 그 결과 그림 1과 같은 레이징 이미지를 얻었다. 마이크로 실린더의 경우와 비슷한 방식으로 레이징 스펙트럼을 분석하여, 모드순서가 $\nu=1$ 이고 극성(polar) 모드수 m 이 $|m| \approx l$ (여기서 l 은 방위(azimuthal) 모드수)를 만족하는 WGM이 발진함을 알 수 있었으며 이때 얻은 Q 값은 $5(3) \times 10^9$ 였다. 이러한 Q 값은 지금까지 마이크로 레이저에서 관측된 Q 값 중 가장 높은 값이다.

참고문헌

1. H.-J. Moon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 3161 (2000).



그림 1 표면감쇠파 레이저에 사용된 마이크로 스피어와 WGM 레이징 모습.