

변형된 미소 원반 레이저의 출력 특성

Highly directional emission from few-micron size elliptical microdisks

김선경, 김세현, 박홍규, 이용희
한국과학기술원 물리학과
jclub@kaist.ac.kr

미소 원반(microdisk) 또는 미소 구형(microsphere) 내에는 속삭이는 회랑 모드(whispering gallery modes; WGMs)라고 불리는 높은 품위값(quality-factor)을 가진 공진 모드가 존재한다. 여기서, WGMs는 구조체의 벽면에 대해 빛이 전반사를 겪으면서 형성되는 모드이며, 이러한 전반사 효과로 인해 빛이 공진기 내에 손실 없이 잘 모여 있게 된다. 광선 광학(ray optics)의 입장에서 보면, 구조체의 대칭성으로 인해, 빛이 벽면에 대해 입사하는 각도는 항상 동일하며, 이에 따라 출력은 원주를 따라 일정한 세기로 이루어진다. 출력에 대한 방향성이 없다는 것은 특정한 렌즈 없이 마이크로 도파로와 같은 구조물 내에 빛을 집속하고자 할 때, 효율성이 떨어지는 단점이 될 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 지금까지 다양한 방법들이 제시되어 왔다^{(1),(2),(3)}. 그 중에서 특히, 원형의 구조체를 사중극자(quadrupole)의 형태로 변형시키는 방법은 특정 방향으로의 출력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 양자 혼돈(quantum chaos) 이론과 결부하여 많은 관심을 끌고 있다. 원형의 구조체가 사중극자의 형태로 점차 변형됨에 따라 WGMs에 해당하는 공진 모드는 손실이 커지면서 점점 사라지게 되며, WGMs과는 별개의 새로운 모드가 등장하게 된다. 가령, WGMs에 해당하는 공진 모드가 모두 사라질 정도로 변형을 주면, TM 편광에 대해 나비 넥타이(bow-tie) 형태의 모드가 나타난다는 것이 보고되었다⁽²⁾. 이는 사중극자의 양쪽 벽면이 거울처럼 작용하여, 기하 광학에서 일컫는 동일 초점 공진 조건(concentric resonant condition)을 만족하기 때문이다. 최근에는 이와는 별개로, 광선 광학에서 예상하는 모든 공진 모드가 사라지는 조건에서 나타나는 상흔 모드(scarred mode)의 존재가 사중 극자의 형태로 변형된 미소 공진기 내에서 발견되었다⁽³⁾. 지금까지 변형된 구형 공진기에서 출력의 방향성을 얻는 노력들은 주로 빛의 파장에 대해 수백 배 이상의 크기를 가지는 공진기에서 이루어졌다. 하지만, 낮은 문턱값(threshold value)을 가지면서, 단일 모드(single mode)로 동작하는 레이저를 구현하기 위해서는 공진기의 크기를 현재의 연구되고 있는 수준에서 더 낮출 필요가 있다. 따라서 우리는 작은 크기의 레이저가 가지는 장점을 그대로 유지하면서, 변형된 원반 레이저가 출력의 방향성을 줄 수 있는지의 여부에 초점을 맞추었다. 이 연구에서는 2~7 mm 정도의 크기를 가진 타원형으로 변형된 원반 레이저에서 강한 방향성이 관측되었음을 보고한다⁽⁴⁾.

이 실험에서 원반 레이저의 동작 매질로는 1.55 μm 근처 에서 최대 형광을 나타내는 InGaAsP 다중 양자우물 구조를 채택했으며, 매질의 굴절률은 3.4 이고, 원반의 두께는 200 nm 이다. 타원형 원반 레이저의 크기와 변형 정도에 해당하는 이심률은 전자빔 리소그라피 과정에서 조절할 수 있다. InGaAsP 과 InP 층의 식각은 Cl_2 와 Ar의 혼합 기체를 이용한 CAIBE(chemically assisted ion beam etching)를

통해 이루어진다. 그림 1(a)와 (b)는 제작이 끝난, 장축의 크기가 7.6 mm 이고, 장축과 단축의 비가 0.76 인 타원형 원반 레이저의 옆과 위에서 찍은 전자 현미경 사진이다. 그림 1(b) 내에 위치한 흰색 마름모는 원반을 지지하고 있는 기둥을 나타낸다. 그림 1(c)는 이 구조에 대한 스펙트럼, L-L 곡선, 근접장 이미지를 각각 관찰한 것이다. 스펙트럼과 L-L 곡선으로부터 문턱값이 1 mW 이고, 단일 모드로 동작함을 알 수 있다. 근접장 이미지에서 타원의 장축 선상에 보이는 밝은 점은 변형된 타원형 원반의 경우 빛의 방출이 주로 구부러짐이 큰 영역에서 주로 이루어진다는 것을 나타낸다.

그림 2(a)와 (c)는 장축의 길이가 각각 7.6 mm, 5.4 mm 인 타원형 원반 레이저에서 먼 장을 측정한 결과이다. 이 두 구조의 장축과 단축의 비의 차이는 0.02 보다 작다. 먼 장 영역에 나타나는 여러 개의 무늬는 WGMs을 이루는 전기 극자(electric dipole) 중에서 구부러짐이 큰 영역 주위에 위치한 극자들이 보다 높은 확률을 가지고 방출한 것을 나타낸다. 근접장 이미지에서 밝게 보이는 점의 위치와 먼 장의 세기가 가장 센 부분이 서로 수직을 이룬다는 것은 빛의 방출이 주로 투과(tunneling)에 의해 이루어졌기 때문이다. 그림 2(a)와 (c)를 비교하면, 공진기의 크기가 작아질수록 먼 장에서 나타나는 무늬의 개수가 줄어들게 되며, 더 강한 방향성을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 구부러진 영역 주위에서 발생하는 투과 현상이 크기가 작아질수록 보다 효과적으로 일어나기 때문이다. 그림 2(b)와 (d)는 실험과 동일한 구조에서 먼 장을 전산 모사한 결과이며, 실험에서 관측한 대로 같은 양상을 보였다.

우리는 이 연구에서 타원형 원반 레이저에서 크기가 작아질수록 출력에 있어 강한 방향성을 가짐을 관측하였다. 이번 발표에서는, 이 결과들과 아울러 실험에서 사용한 것보다 더 작은 크기 2-mm 의 원반 레이저에서 나타나는 특성들을 보고할 예정이다.

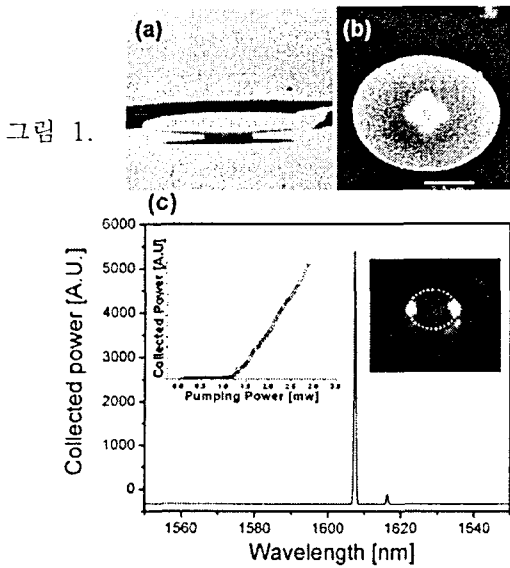


그림 1.

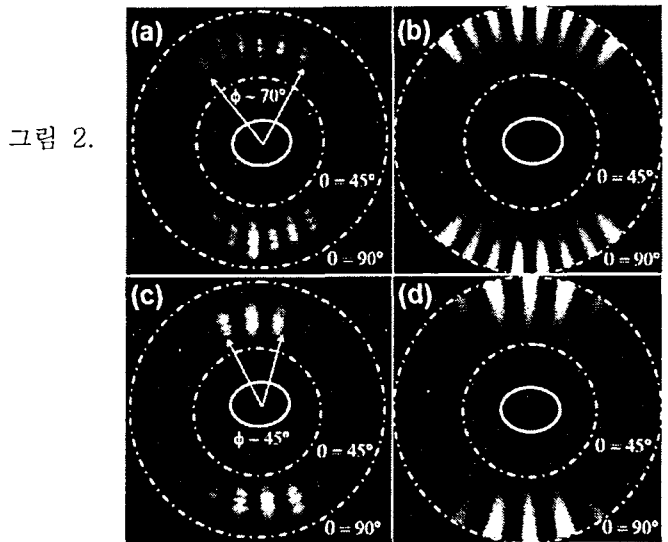


그림 2.

1. A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. L. McCall, J. L. Glass, S. J. Pearton, and R. A. Logan, Appl. Phys. Lett. 62, 561 (1993).
2. C. Gmachl, F. Capasso, E. E. Narimanov, J. U. Nockel, A. D. Stone, J. Faist, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, Science 280, 1556 (1998).
3. N. B. Rex, H. E. Tureci, H. G. L. Schwefel, R. K. Chang, and A. D. Stone, Phys. Rev. Lett. 88, 094102 (2002).
4. S. K. Kim, S. H. Kim, G. H. Kim, H. G. Park, D. J. Shin, and Y. H. Lee, Appl. Phys. Lett. (2004) (to be published)