

방향성 방출특성을 가진 초고품질 상흔모드의 효율적 여기

Pump-optimized ultrahigh-Q-scarred-mode lasers with directional output

이상범, 심정보*, 전형수, 김상욱**, 이해웅*, 이재형, 안경원
서울대학교 물리학과, *한국과학기술원 물리학과, **부산대 물리교육과
lsbum@photon.snu.ac.kr

비대칭형 미소 공진기는 원형 미소공진기 갖는 단점인 등방성 방출특성을 극복하는 대안이 되며, 또 공진기 내에서 빛살궤적이 혼돈현상을 보이기 때문에 고전혼돈과 양자혼돈현상을 연구하기 위한 좋은 시스템으로 간주되고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 원형공진에서 펌프광의 효율은 입사빔의 방향에 무관하다. 이 경우 펌핑 효율을 높이기 위한 방안으로 (즉 low threshold laser를 만들기 위하여) evanescent wave를 이용한 펌핑이 있는데, 펌프광의 coupling 효율을 높이기 위해서는 미세한 위치 조정이나 파장 제어가 필수적이다. 본 연구에서는, 적절한 각도로 입사한 펌프광이 공진기내에서 여러번 전반사 현상을 겪으면서 비대칭형 공진기가 지원하는 공진모드인 상흔모드와 공간분포가 비슷해질 수 있으며, 이 경우 매우 효율적으로 상흔모드의 펌핑이 이루어 질 수 있음을 이론적으로 제안하고 실험적으로 입증하였다.

실험에서 비대칭형 공진기는 비원형 단면을 가진 노즐에서 분사되는 액체 제트를 통하여 만들어졌다. 사용된 액체는 색소 RhB 0.1mM/L 가 첨가된 에탄올(굴절률 1.361, 반경 16 μ m)이다. 초기에 임의의 단면모양으로 분사된 액체제트는 일정한 시간이 지나면 사중극자 진동모드만 남고 다른 높은 차수의 모드는 모두 사라지는 성질을 갖고 있다. 액체 제트 발생장치를 정밀 rotational stage의 중심부에 부착하여 여러 방향에서 레이징 이미지, 출력의 방향성 및 입사빔의 방향에 따른 출력빔의 효율을 측정할 수 있도록 하였다. 여기광으로는 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저(파장532nm, 펄스폭 10ns)를 사용하였다. 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 17%의 변형도에서 가장 큰 방출방향은 공진기의 단축으로부터 30° 벗어났다. 1차원 광검출기에 의한 방향성측정과 대물렌즈에 의한 이미징을 동시에 측정한 결과, 17%에서 발진한 모드는 6각형 불안정 주기궤도의 장축에 가까운 꼭지점에서 접선방향으로 강한 방출을 나타내는 상흔모드임을 입증할 수 있었다. 그리고, 최소 문턱세기를 가지는 파장 분석으로부터 품질값이 4×10^7 임을 알 수 있었다⁽⁴⁾. 그림 1(c)는 펌프빔의 각도에 따른 출력효율을 나타낸다. 단축으로부터 45° 입사 되었을 때 최대 효율을 얻을 수 있었다. 이러한 현상을 설명하기 위해 전산시뮬모델을 만들었다. 그림2와 같이 충분히 많은 수(10^4)의 빛살을 공진기에 입사시킬 때 주어진 입사각에 대해 입사된 각 빛살들이 굴절에 의해 밖으로 빠져나갈 때까지 전반사에 의해 진행한 거리 $l(i)$ 를 계산했다. 공진기 내에서 빛살들의 평균 밀도 s 를
$$\sigma = \sum_i l(i)/2\pi a$$
 (a : 공진기의 평균 반지름)으로 정의하였다. 그림2(a)는 사중극자 모양의 단면을 가진 공진기에 입사각에 따른 빛살들의 평균 밀도를 나타낸다. 그림1(c)에서 실험값

과 같이 45° 근처에서 강한 증가를 볼 수 있다. 반면 그림2(b)에서 같은 변형도를 가진 Integrable 시스템인 타원모양의 공진기내에 빛살들의 평균 밀도는 입사각에 따른 큰 변화를 보이지 않음을 확인할 수 있다. 본 연구의 전산시뮬에서 고려한 것은 초기에 전반사각을 만족하는 ray가 여러 번 전반사를 한 후에 입계각보다 작은 각에서 굴절에 의해 빠져나가는 것인데, 반대로 빠져가는 부분에 반대 방향으로 빛을 입사하면 역으로 굴절에 의해 cavity안으로 입사하고 여러 번 전반사를 하게 됨을 생각해 볼 수 있다. 이러한 아이디어를 이용하면 고효율성과 방향성을 동시에 가진 광원소자의 개발이 가능할 것으로 전망할 수 있

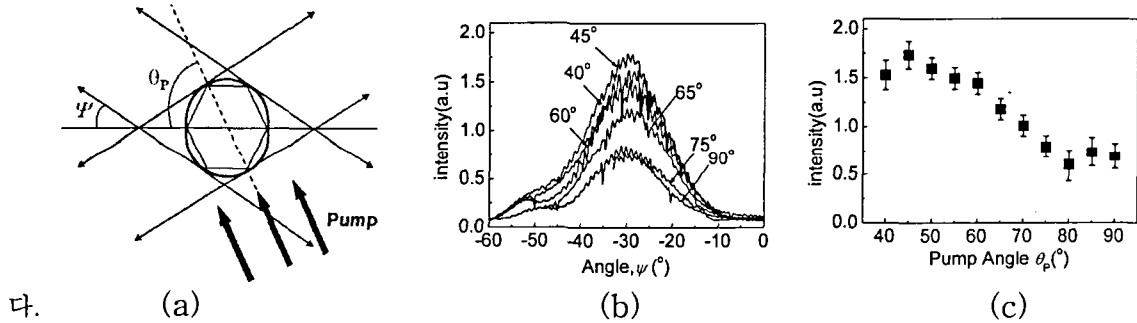


그림1. (a) 실험 장치도, 펌프빔의 입사각에 따라 측정된 방출빔의 방향성(b)과 출력(c)

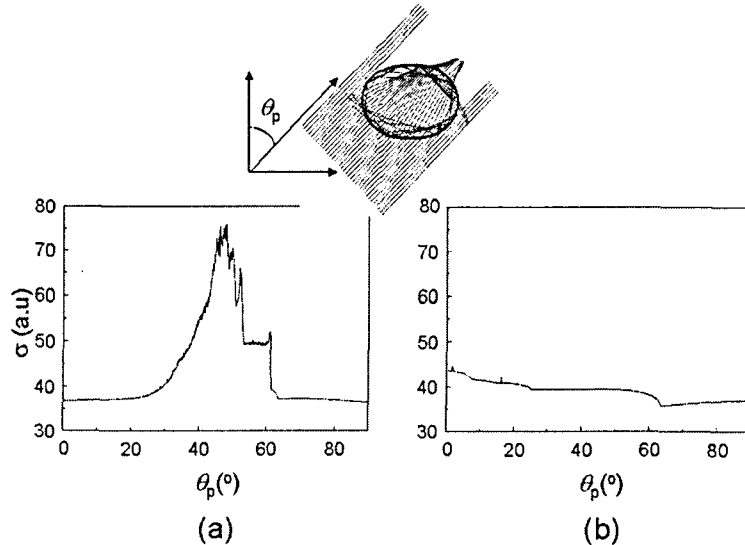


그림 2. (a)사중극자 모양과 (b) 타원모양의 다면을 가진 공진기에 내에 입사 각도에 따른 빛살의 평균밀도: 평면파가 입사 되었을 때 공진기 내부에서 입사빔의 세기에 대한 빛살 모델

참고문헌

1. J. U. Nöckel, and A. D. Stone, Nature 385, 45 (1997).
2. C. Gmachl, F. Capasso, E. E. Narimanov, J. U. Nockel, A. D. Stone, G. J. Faist, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, Science 280, 1493 (1998).
- 3 E. J. Heller, Phys. Rev. Lett. 53, 1515(1984)
- 4 S. B. Lee, J. H. Lee, J. S. Chang, H. J. Moon, S. W. Kim, K. An, Phys. Rev. Lett. 88, 033903 (2002)

