

단일 세포 광결정 나노 레이저의 먼 장 분포 측정을 이용한 레이저 모드 분석

Mode identification of single cell photonic crystal nano-laser using far-field measurement

강주형, 서민교, 김선경*, 김세현**, 이용희

물리학과, 한국과학기술원 (KAIST), *LG Innotec,

**Dept. of Electrical Engineering, California Institute of Technology

kangjuhy@gmail.com

최근 광결정 레이저는 자연계가 허용하는 가장 작은 모드 부피 (mode volume)와 높은 품질값 (Q)을 가지고 있다. 이를 이용하여 낮은 문턱 값으로 동작하는 레이저 (low threshold laser)⁽¹⁾, 이득 매질과의 상호 작용을 이용한 양자 전기 역학 (cavity quantum electrodynamics)⁽²⁾, 단일 광자원 (single photon source) 구현 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다⁽³⁾. 특히, 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 2차원 박막형 삼각격자 광결정 구조에 구멍 하나를 뚫은 단일 세포 광결정 레이저는 자연계가 허용하는 가장 작은 모드 부피인 $(\lambda/2n)^3$ 의 수 배에 해당하는 매우 작은 모드 부피를 가지고 있어 이를 이용한 많은 연구가 진행되어 왔다⁽⁴⁾.

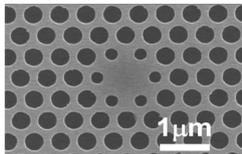


그림 1. 제작된 단일 세포 광결정 공진기의 전자현미경 사진.

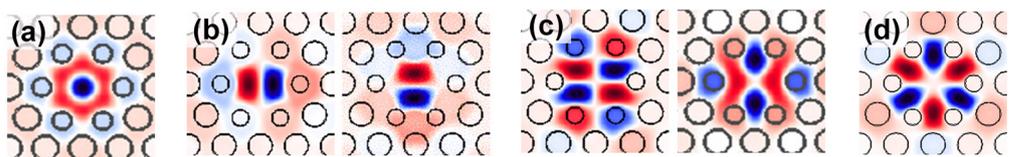


그림 2. 단일 세포 광결정 공진기 안에 존재하는 (a)홀극자 모드, (b) 쌍극자 모드, (c) 사극자 모드 와 (d) 육극자 모드의 자기장의 z 성분(H_z) 분포.

그림 2에서 보이는 바와 같이 단일 세포 광결정 공진기에는 자기장의 z 성분의 분포 모양에 따라 홀극자 (monopole) 모드, 쌍극자 (dipole) 모드, 사극자 (quadrupole) 모드와 육극자 (hexapole) 모드가 존재한다. 이 모드들은 품질값, 모드 부피, 축퇴 (degeneracy), 방출 특성 (emission property)등이 각각 달라 이를 효과적으로 이용하기 위해서는 제작된 레이저가 어떤 모드로 동작하는지를 잘 알아낼 수 있어야 한다. 쌍극자 모드의 경우에는 다른 모드들과는 달리 빛이 위쪽으로 방출하고 선형 편광되어 있는 특성이 있어 렌즈를 이용하여 빛의 방출 특성을 측정하면 쉽게 알아낼 수 있다. 위와 같은 방법으로는 렌즈의 개구수 (numerical aperture)에 의해 어느 특정 각 이내에 방출하는 빛만을 측정할 수 있다. 그런데 홀극자, 사극자, 육극자 모드는 빛이 수직 방향으로 방출하지 않고 넓은 각도에 걸쳐 방출하기 때문에 렌즈를 이용해서 모드를 구분해 내기가 어렵다.

본 연구에서는 이 문제를 극복하기 위해 그림 2에서 보이는 바와 같은 먼 장 (far-field) 측정 장치를

사용하였다⁽⁵⁾. 샘플 아래쪽 방향에서 광펌핑 된 광결정 레이저가 ϕ -방향으로 회전하고, 광검출기가 θ -방향으로 회전하여 3차원 반구면의 모든 방향에서 빛의 세기를 측정한다. 이 때, 광검출기 앞에 편광판을 놓아 θ -편광 성분과 ϕ -편광 성분을 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 먼 장 결과는 그림 2의 작은 그림에 나타난 것처럼 2차원 평면으로 전사 (mapping)하여 나타낸다.

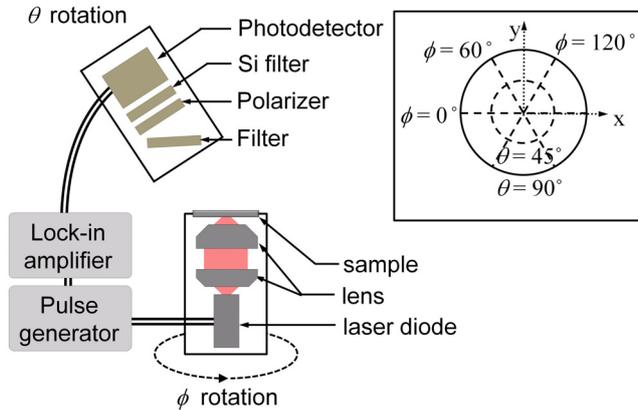


그림 3. 단일 세포 광결정 레이저의 먼 장 분포 측정 장치의 개략도. 3차원 반구면의 모든 방향에서 측정된 결과는 작은 그림에 나타난 것처럼 2차원 평면에 전사하여 나타낸다.

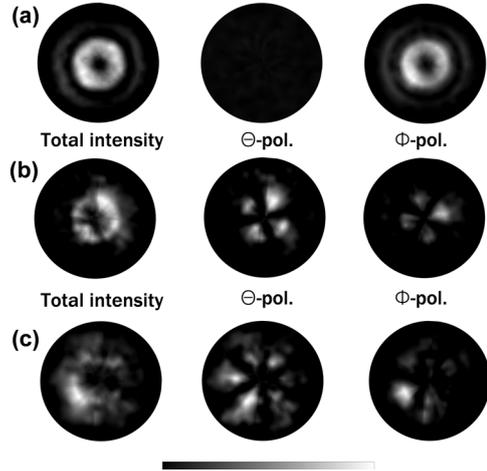


그림 4. (a) 홀극자 모드, (b) 사극자 모드, (c) 육극자 모드의 먼 장 분포 측정 결과. 왼쪽부터 전체 세기, θ -편광, ϕ -편광.

그림 3은 홀극자, 사극자, 육극자 모드의 먼 장 측정 결과를 나타내고 있다. 먼 장의 전체 세기를 보면 크게 다르지 않다. 하지만 편광 성분을 보면 분명한 차이가 드러난다. 홀극자 모드의 경우, θ -편광 성분은 거의 없고 대부분 ϕ -편광 되어 있다. 이는 홀극자 모드가 자기 쌍극자 (magnetic dipole)와 비슷한 특성을 가지고 있음을 나타낸다⁽⁶⁾. 반면, 사극자 모드와 육극자 모드의 경우, θ -편광 성분과 ϕ -편광 성분이 각각 4개와 6개의 로브(lobe)를 가지고 있다⁽⁷⁾. 또한 θ -편광 성분과 ϕ -편광 성분의 배 (node)와 마디 (antinode) 부분이 서로 교차되어 있다. 이는 사극자 모드와 육극자 모드가 각각 $m=2$ 와 $m=3$ 인 속삭이는 회랑 모드 (whispering gallery mode)와 비슷한 특성을 가지고 있기 때문이다.

본 연구에서는 편광 성분을 구분할 수 있는 먼 장 분포 측정 장치를 이용하여 단일 세포 광결정 공진기에 존재하는 홀극자 모드, 사극자 모드, 육극자 모드의 먼 장을 측정하였다. θ -편광 성분과 ϕ -편광을 측정하여 실제 레이저 발진된 모드가 어떤 모드인지를 구분하였다. 또한 홀극자 모드의 경우, 자기 쌍극자의 특성을 가지고 있고, 사극자 모드와 육극자 모드의 경우 각각 $m = 2$ 와 3 인 속삭이는 회랑모드의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. H. Y. Ryu et al., *Appl. Phys. Lett.* 80, 3476 (2002).
2. T. Yoshie et al., *Nature* 432, 200 (2004).
3. J. M. Gerard et al., *Proc. SPIE* 5361, 88 (2004).
4. H. G. Park et al., *Appl. Phys. Lett.* 79, 3032 (2001).
5. Dong-Jae Shin et al., *Quantum Electronics, IEEE Journal on*, 38, 857 (2002).
6. M. L. Povinelli et al., 82, 1069 (2003).
7. Se-Heon Kim et al., *Phys. Rev. B* 73, 235117 (2006).