

2차원 광결정 박막위에 제작된 막대형 공진기의 모드 특성

Modal characteristics of a stick resonator in a two-dimensional photonic crystal slab

김세현, 김국현, 권순홍, 김선경, 이용희

한국과학기술원 물리학과

seheon@webmail.kaist.ac.kr

이 연구에서는 광결정 (photonic crystal) 박막 (slab) 위에 제작된 막대형 공진기의 공진모드의 특성을 보고한다. 먼저 3차원 FDTD 방법을 이용하여 각각의 공진 모드들의 모드 형태, 공진주파수, 품위값 (Q factor) 등을 구하였다. 광결정 격자의 주기가 a 일 때, 슬랩의 두께는 $0.4 a$, 구멍의 반지름은 $0.35 a$ 로 하였다. 슬랩의 굴절률 (n) 은 실험에서 사용한 InP의 $1.55 \mu\text{m}$ 에서의 굴절률 값인 3.4 로 정하였다. 그림 1은 12 개의 공기 구멍을 메워서 만든 막대형 공진기에 나타나는 대표적인 공진 모드들을 보여준다. 공진 모드의 시간에 대한 변화를 살펴보면, 노드 (node)의 위치는 변하지 않고 필드 (field)의 세기만이 $\exp(-i\omega t)$ 로 변하는, 정상파 (standing wave)의 특성을 볼 수 있다. 또한 필드의 형태가 광결정 도파로 (waveguide)의 도파 모드와 비슷한데, 그림 1의 (a)-(c)는 even 도파 모드와 그림 1의 (d)-(f)는 odd 도파 모드와 매우 유사함을 알 수 있다. 이 경우에 전체 공진모드의 개수는 각각의 도파 모드 (even, odd) 마다 13개의 모드만이 존재하는데, 이것은 공진기의 양 끝단에서 일어나는 필드의 침투 (penetration)를 고려하여 공진기의 유효 (effective) 길이를 $13 a$ 정도로 볼 때에, $kL = m\pi$ (m 은 정수, k 는 파수벡터)인 간단한 패브리-페로 (Fabry-Perot) 공진 조건으로⁽¹⁾ 결정된 것임을 알 수 있었다 (그림 2). 공진 모드들의 품위값을 조사해 보면, even 모드의 경우 ω 와 k 가 광추 (light cone) 속에 있을 때 400 - 600 정도를 가지며 광추 밖에 있으면 10,000 이상의 높은 품위값을 가진다. Odd 모드의 경우는 광추 속에 있으면 품위값이 100 정도로 매우 작으며 광추 밖에 있으면 400 - 15,000 정도로 높은 품위값을 가진다. 이상적으로 제작된 무한히 긴 길이를 가지는 광결정 도파로의 경우 광추 밖에 있는 모드는 광손실이 전혀 없는 것으로 알려져 있다. 하지만 유한한 길이를 갖는 막대형 공진기의 경우 광추 밖에 있다고 하더라도 유한한 길이 (ΔL) 로 인하여 공진 모드의 파수벡터 k 가 Δk 의 불확정성을 가지기 때문에 광추 속에 놓이는 k 의 성분이 생기게 되며, 또한 막대의 양 끝단에서의 산란에 의한 손실로 인하여 품위값에 제한을 받게 된다. 한 가지 흥미로운 사실은 even 모드 중에서 그림 1(a)에 나타낸 모드가 2,000,000 이상의 매우 큰 품위값을 가지는데, 그 이유를 살펴보면, 파수 벡터의 성분 중에서 광추 속에 놓이는 성분이 거의 없으며, 막대의 양 끝단으로 갈수록 필드의 세기가 감소하여 끝단에 이르기 전에 필드가 0이 되기 때문에 양 끝단에서 일어나는 산란도 매우 작기 때문이다. 이와 같이 높은 품위값을 가지는 모드는 앞으로 양자 공진기 동역학 (cavity QED)에서 좋은 연구 소재가 될 수 있을 것으로 기대한다.

실제로 InP/InGaAsP 물질을 이용하여 200 nm 정도 두께의 슬랩 위에 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography) 등의 방법을 사용하여 막대형 공진기를 제작하였다.⁽²⁾ 그림 3은 광펄스를 통하여 중심 파장이 1550 nm 정도인 InGaAsP 양자 우물 (quantum well)에서 나오는 PL (photoluminescence)을 이용하여 측정된 공진 모드들의 peak을 보여준다. 3차원 평면파 전개 (plane wave expansion) 방법을

사용하여 계산된 도파로의 분산 곡선과 비교하면, 0.340 - 0.345 근처의 peak들은 odd 모드로부터, 0.350 - 0.365 의 peak들은 even 모드로부터 기인하였음을 알 수 있었다. 특히 광펌핑 조건을 바꾸어 주면 화살표로 나타낸 모드는 단일 모드의 레이저로 작동함을 확인 할 수 있었다. 다음으로 분광기 앞에 편광판 (polarizer)을 놓고 돌려가면서 각각의 모드들의 편광 특성을 조사하여 보았다 (그림 4). 그 결과 even 모드의 경우는 공진기 길이의 수직 방향으로 선편광 되어 있지만, odd 모드의 경우에는 공진기 길이 방향으로 선편광 되어 있었다. 이것은 막대형 공진기의 공진 모드들이 두 가지의 다이폴 모드 (dipole mode) 로부터 기인하는 것으로 이해될 수 있다. 단일 결합 공진기에서 나타나는 이중으로 축퇴된 두 개의 다이폴 모드는 진동 방향에 수직하면서 서로 90도 만큼 차이가 나는 선편광 특성을 보임이 잘 알려져 있다.⁽³⁾ 광결정 도파로는 이와 같은 단일 결합 공진기를 일렬로 늘어놓은 것으로 볼 수 있고, 인접한 다이폴들 사이의 강한 상호작용으로 인하여 coupled resonator에서처럼, 공진기 길이 방향으로 파수 벡터 k 를 가지며, 각각의 다이폴들이 길이 방향 (longitudinal) 혹은 수직 방향 (transverse) 으로 진동하면서 도파모드가 형성되는 것으로 생각할 수 있다. 결과적으로 even 모드와 odd 모드는 서로 90도 만큼 다른 선편광 특성을 가진다.

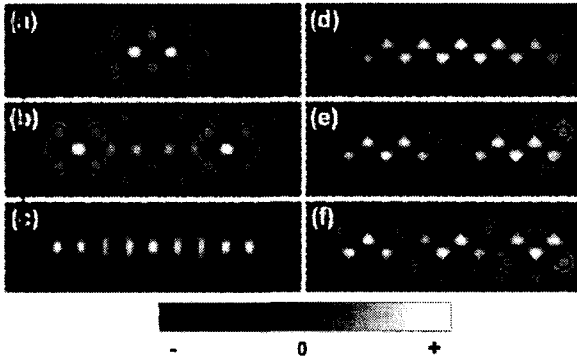


그림 1. 3차원 FDTD 방법으로 계산된 막대형 공진기의 공진 모드

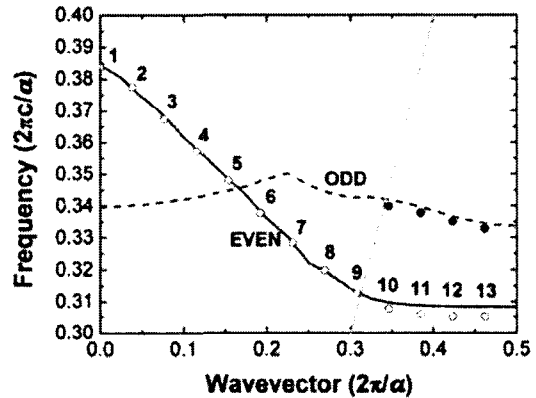


그림 2. 광결정 도파로의 분산 곡선과 막대형 공진기의 공진 모드.

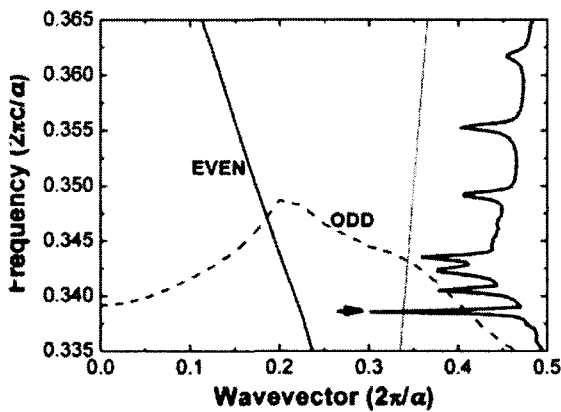


그림 3. 광펌핑 실험을 통해 측정된 스펙트럼.

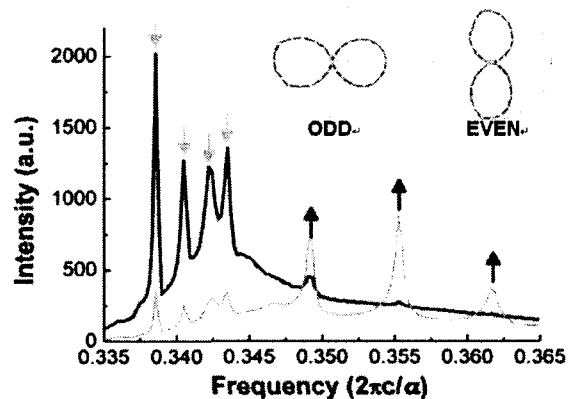


그림 4. 막대형 공진기 공진 모드의 편광 특성

1. X. Letartre, et al. Appl. Phys. Lett. 79, 2312 (2001).
2. H. Y. Ryu, et al. J. Sel. Top. Quantum Electron. 8, 891 (2002).
3. O. Painter, et al. Opt. Lett. 27, 339 (2002).