

이차원 광 결정 박막형 공진기와 광섬유 간 결합특성에 대한 연구 Characteristics of Fiber Coupling with 2D Photonic Crystal Cavities

김명기, 황인각, 이용희
한국과학기술원 물리학과
kmk1852@kaist.ac.kr

최근의 광 결정 제작 기술의 급격한 발전은 양자 광학, 비선형 광학, 레이저 및 광 통신 공학 발전의 가능성을 열어주고 있다. 특히 이차원 박막형 광 결정 공진기는 다른 광 결정 공진기보다 제작이 상대적으로 용이하기 때문에 많은 그룹에서 이에 대한 연구가 빠르게 진행 중에 있다. 하지만 제작된 광 결정 공진기를 이용하는 데 있어서 가장 큰 어려움은 광 결정 공진기와 외부 장치와의 결합이다.

광 결정 공진기의 외부 광 장치와의 결합을 위해 여러 가지 방법들이 연구 및 발표되고 있다. 광 결정 공진기 주변에 광 결정 도파로를 두고, 광 결정 도파로와 광섬유 사이의 결합을 통해 외부장치와의 인터페이스를 하는 방식이 최근 연구 발표되었다⁽²⁾. 이 방식은 직접 광 결정 도파로를 이용하기 때문에 광 결정 집적 회로 구성에 매우 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만, 광섬유와의 높은 결합을 위해서는 광 결정 물질과 광섬유 간의 높은 굴절률 차이로 인한 광 손실을 최소화해야 하고, 또한 광 결정 도파로 내 진행하는 파의 작은 모드 크기를 광섬유와 결합시켜야 하는 어려움을 가지고 있다.

이러한 문제점을 최소화하기 위해 최근에는 Tapered Fiber를 광 결정 공진기에 직접 결합시켜 외부 장치와 광섬유로 인터페이스를 하는 방식이 연구되고 있다⁽³⁾. 이 방식의 장점은 앞서의 결합 방식과 달리 정교한 제작이 필요하지 않고, 쉽게 여러 공진기와 결합을 할 수 있다. 하지만, 광 결정 구조에 따라 결합 효율이 급격하게 달라지기 때문에 광섬유와 공진기 사이의 결합 특성과 성질을 제대로 인식하고 설계해야 원하는 결합 결과를 얻을 수 있게 된다.

이번 발표에서는 광 결정 박막형 공진기와 Tapered Fiber사이의 결합 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 함께 비교하여 발표하고자 한다.

■ 광섬유 결합에 용이한 광 결정 공진기 제작

광 결정 공진기의 큰 장점의 하나는 공진기 구조에 약간의 변형을 통해 공진기 특성을 쉽게 변화시킬 수 있다는 것이다. 이는 결국 광섬유와 최적의 결합을 얻을 수 있는 공진기의 제작이 가능하다는 것을 의미한다.

모든 장치들 간의 결합과 마찬가지로 광섬유와 광 결정 공진기의 결합을 위해서는 위상과 모드 조화가 필요하다. 광 결정 공진기는 각 모드에 따라 특정 위상분포를 가지고 있다. 이는 그 공진기가 가지는 Field의 k-component를 분석함으로써 알 수 있는데, 일반적으로 광섬유의 모드 특성과 광 결정 Linear Cavity사이의 모드가 가장 결합이 용이하다.

그림 1(a)은 제작된 광 결정 공진기를 나타내며, 그림 1(b)은 공진기내 존재하는 Field의 k-components의 위상 분포를 나타낸다. 그림 2 에서 점선은 Light-Cone을 의미하며, 실선으로 표시된 영역이 광섬유와의 결합 영역을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 Linear Cavity는 광섬유와 결합 가능한 공간을 많이 차지함으로써 결합 효율이 좋다는 것을 알 수 있다. 그림 1과 같이 약간의 공진기의 공

기구멍의 변화를 가해 줌으로써 최적의 결합 효율을 얻을 수 있게 된다. 이론적으로 약 80%의 결합 효율을 얻을 수 있었고, 전체 Q값은 약 5200의 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

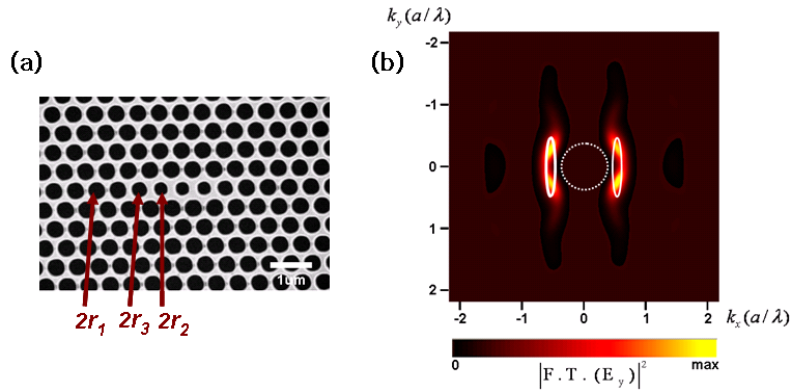


그림 1. (a) 제작된 광 결정 공진기($r_1=0.35a$, $r_2=0.25a$, $r_3=0.27a$, $a=500\text{nm}$) (b) 공진기내 Field의 위상분포

■ 광섬유와의 결합 특성

광섬유와 광 결정 공진기사이의 결합을 하는 과정에서 공진기의 특성이 변하게 된다. 이는 이차원 광 결정 공진기가 수직 방향으로 전반사에 의해 빛을 가두는 특성을 광섬유가 변화를 가져왔기 때문이다. 결론적으로 광섬유가 공진기내에 가까워짐에 따라 공진기의 중심 파장은 증가를 하게 되고, 공진기의 Q값(결합에 의한 손실을 제외한 본래의 Q값)은 감소(~30%)를 하게 된다. 이는 시뮬레이션 및 실험을 통해서도 확인할 수 있는데 그림 2는 실험을 통해 얻어진 Transmission결과이고, 그림 3은 얻어진 Transmission을 통해 얻어진 Q값을 의미한다. 얻어진 Transmission을 바탕으로 공진기의 본래 Q값과 Fiber Coupling Ratio을 결합 모드 방정식을 통해 계산되어 진다.

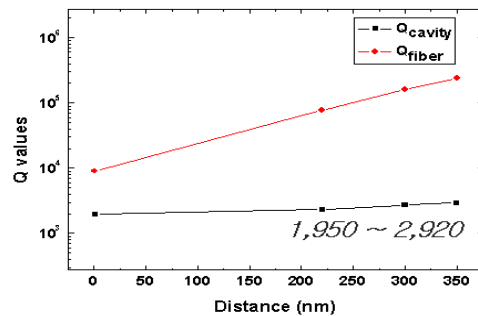
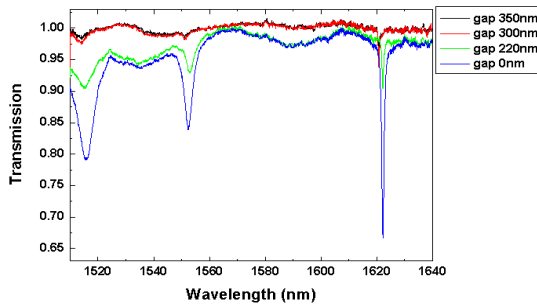


그림 2. Fiber Coupling을 통해 얻어진 Transmission. 그림 3. 거리에 따른 Q-factor의 변화량

1. I. K. Hwang et al, "Curved-microfiber coupling for photonic crystal light emitter," Appl. Phys. Lett. 87, 131107 (2005)
2. M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, E. Kuramochi, and H. Y. Ryu, "Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs," Opt. Express 12, 1551-1561 (2004)
3. K. Srinivasan, et al. "Optical-fiber-based measurement of an ultrasmall volume high-Q photonic crystal photonic crystal microcavity," Phys. Rev. B, vol 70, p. 081 306 (2004)