

재형성 가능한 사각격자 광결정 공진기

Reconfigurable Square Lattice Photonic Crystal Resonator

김주영, 김명기, 이용희, 황인각*

한국과학기술원 물리학과, 전남대학교 물리학과*

callow@kaist.ac.kr

광결정 공진기(Photonic Crystal Resonator)는 파장 수준의 모드 부피를 가지면서도 높은 품위 값을 가질 수 있어 양자광학 연구 및 실현 가능한 단일 광자원(Single Photon Source) 공진기로 많은 주목을 받고 있다.

단일광자원의 구현은 능동매질로 양자점(Quantum Dot)과의 결합을 필요로 하는데, 크기가 파장 수준인 광결정 공진기 안에 양자점을 정확히 위치시키는 것은 매우 도전적인 일이다. 더불어 광결정 공진기의 높은 품위값에 따른 좁은 공진 선평은 원자와 같이 불연속적인 전자 모드 밀도(Density Of States)를 가지는 양자점과의 결합을 어렵게 만든다. 그러므로 공정 후 광결정 공진기의 특성(위치와 공진주파수)을 미세하게 조절할 수 있는 기술은 실용적으로 또한 학문적으로 절실히 요구되고 있다.

최근 구부러진 미세광섬유를 광결정 도파로 위에 접촉시킴으로 공진기를 만들고 레이저를 발진한 것이 실험적으로 보고되었다.¹ 광섬유와 광결정 도파로와의 접촉점을 중심으로 공진기가 형성되며, 공진기의 위치를 공정 후에 수 나노미터 수준으로 제어할 수 있으면서도 높은 품위값과 광섬유와의 결합효율을 동시에 얻을 수 있어, 양자점 기반 연구에 유용한 방법을 제공할 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 이를 더욱 확장하여 도파로가 아닌 결합 없는 광결정 패턴 위 어느 곳에서도 재형성 가능한 광결정 공진기(Reconfigurable Photonic Crystal Resonator, RPCR)를 제안한다. 이는 공간적 차원을 한 단계 높여 완전한 자유도의 이차원 재형성성(Reconfigurability)을 제공, 보다 유용한 양자점 기반 연구를 가능하게 할 것으로 기대한다. 미세광섬유는 또한 공진기와의 효율적인 결합 채널을 동시에 제공한다.

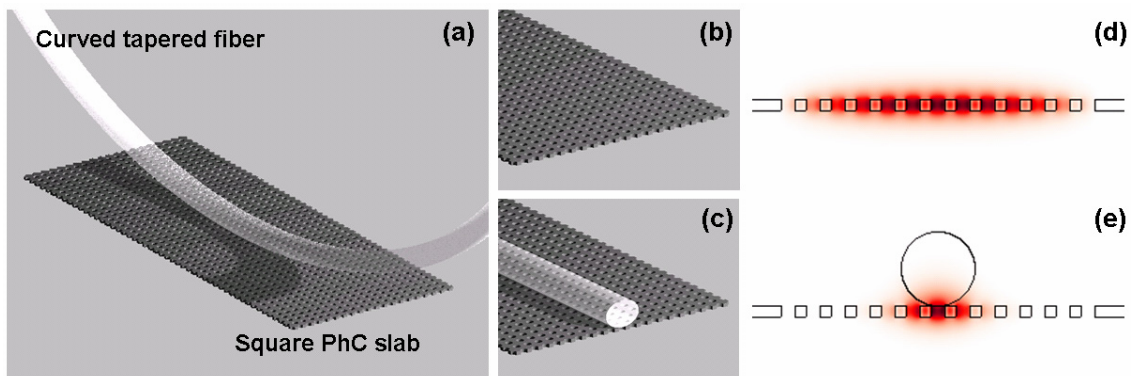


그림 1. (a) 광결정 슬랩 위에 구부러진 광섬유가 결합된 모습. (b)와 (c) 광결정 슬랩과 그 위에 곧은 광섬유가 올려져 있는 모습. (d) X2 밴드 가장자리 모드 그리고 (e) 광섬유를 올려놓았을 때 유도된 도파로 모드의 E_y field profile. (3D periodic FDTD 전산모사) 광섬유를 따라 전기장이 잘 집중된다.

그림 1의 (b)는 결합이 없는 사각격자 광결정 박막이며 (c)는 그 위에 미세광섬유($D = 1.5\mu\text{m}$)를 올려놓은 모습이다. 사각격자의 ΓX 방향을 따라 광섬유를 놓게 되면 광섬유의 굴절률로 인한 굴절률-유도(index-guiding) 효과로, 사각격자 광결정 모드로부터 광섬유를 따라 도파로 모드가 유도되는데, 이는

H_z field의 profile과 아래쪽으로 내려온 분산곡선으로부터 그 기원을 확인할 수 있다[그림 2.(b)]. 그림 1.(e)는 X ($k = 0.5$)지점에서 유도된 도파로 모드의 E_y field profile로 전기장이 광섬유와 광결정 박막의 접촉점 아래쪽으로 잘 집중되어 있음을 보여준다.

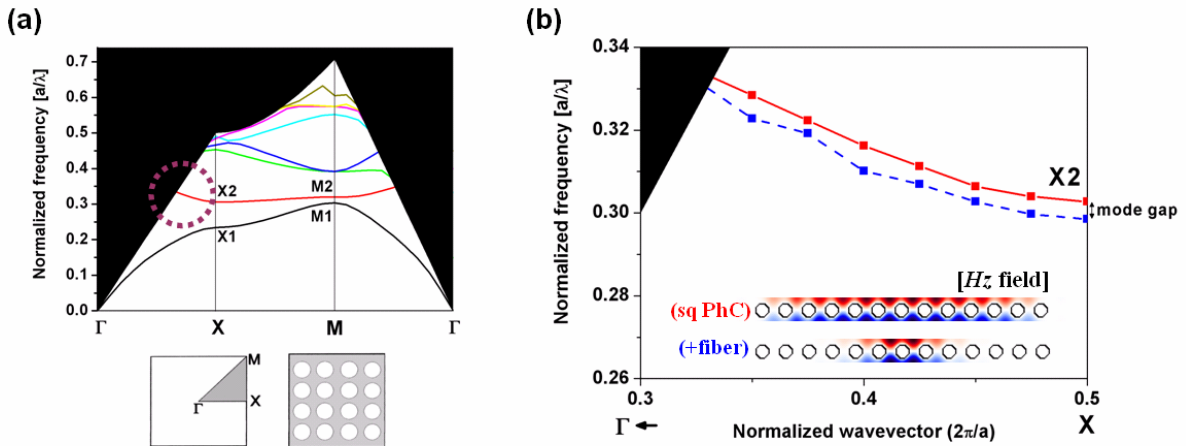


그림 2. (a) 사각격자 광결정 슬랩의 TE 모드 분산 곡선. 공기구멍의 크기(r)는 $0.30a$, slab의 두께(t)는 $0.4a$, 굴절률은 3.4 이다. (b) 사각격자 슬랩의 분산 곡선(빨간색)과 그 위에 미세광섬유를 가져갔을 때 유도되는 도파로 모드의 분산곡선(파란색). 3D periodic FDTD 방법이 사용되었다.

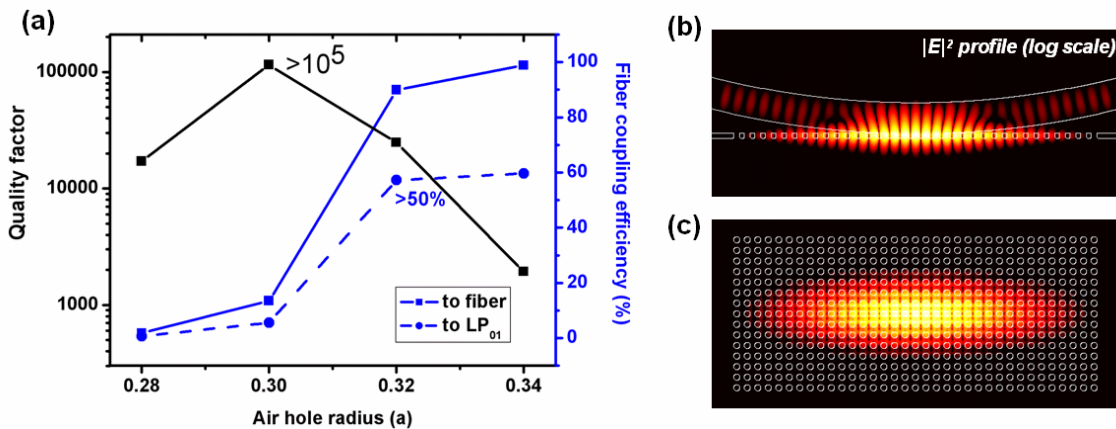


그림 3. (a) 사각격자 공기구멍 크기에 따른 RPCR의 품위값(검정)과 결합효율(파랑). 파랑 점선은 광섬유 기본 모드(LP01)으로의 결합효율²이다. (b)와 (c) RPCR의 에너지분포(log scale, 3D FDTD 방법). 사각격자 공기구멍의 크기(r)는 $0.32a$ 이다. $Q > 24000$, 광섬유 LP01 모드로의 결합효율은 $> 50\%$

유도된 도파로 모드는 슬랩과 광섬유 간의 거리에 의해 그 분산 곡선이 결정되는데, 구부러진 광섬유를 광결정 슬랩에 접촉시키면, 접촉점을 중심으로 이중구조³가 만들어져 높은 품위값을 가지는 공진모드가 형성된다. 3D FDTD 방법으로 접촉점에 높은 품위값($> 10^5$)의 공진기가 형성될 수 있음을 확인하였으며, 양자점과 강하게 상호 작용 할 수 있는 새로운 방법을 제공하리라 기대한다.

¹ Myung-Ki Kim, In-Kag Hwang, Min-Kyo Seo, and Yong-Hee Lee, "Reconfigurable microfiber-coupled photonic crystal resonator," *Opt. Express* 15, 17241-17247 (2007).

² In-Kag Hwang, Guk-Hyun Kim and Yong-Hee Lee, "Optimization of Coupling Between Photonic Crystal Resonator and Curved Microfiber", *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 42, No. 2, 131-136 (2006).

³ B. S. Song, S. Noda, T. Asano, and Y. Akahane, "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," *Nat. Mater.* 4, 207-210 (2005).