

이차원 광결정 공진기를 이용한 광메모리 구현

All-optical memory in photonic crystal resonators

김명기*, 황인각**, 이용희*

*한국과학기술원 물리학과, **전남대학교 물리학과

kmk1852@kaist.ac.kr

광 결정 공진기는 다른 미소 공진기에 비해 매우 작은 크기를 가진다. 그럼에도 불구하고, 이 공진기는 높은 품위값(Quality factor)을 유지하는 특성을 가지는데, 결국 공진기 내 가둬진 빛은 높은 광 밀도를 유지하게 된다. 이러한 특성은 광 결정 공진기를 구성하는 물질의 비선형성에 큰 변화를 가져다준다. 즉, 광 결정 공진기를 이용하면 작은 에너지로도 물질의 높은 비선형성을 얻을 수 있게 되는데, 이는 물질의 비선형성을 이용한 광 스위치, 광메모리, 그리고 광 논리회로와 같은 광소자들의 구동 에너지를 낮추게 한다. 광소자 구현을 위한 여러 방법 중 광 쌍안정성(Optical Bistability)을 이용한 방법은 광메모리 구현에 있어 그 원리가 매우 간단하면서도 높은 효율성을 가진다. 여기서 광 쌍안정성이란 하나의 입력 광 신호에 대해 두 개의 출력 신호를 가지는 상태를 말하는데, 이는 물질의 비선형성과 공진기의 피드백(Feedback) 효과에 의해 구현된다.

이번 연구에서는 이차원 박막형 광결정 공진기의 광 쌍안정성을 이용하여 낮은 에너지로도 구동되는 광메모리를 구현하였다. 특히, 매우 작은 크기의 광결정 공진기와 외부 광 장치와의 결합을 위해 가늘게 테이퍼링(tapering)된 광섬유를 이용함으로써 높은 결합 효율을 얻을 수 있었고, 출력 신호의 손실을 최소화할 수 있었다.

광결정 공진기의 형태는 광섬유와의 결합 효율을 높이기 위해 5개의 공기구멍을 메운 막대 형태의 공진기로 제작하였다 (그림 1). 공진기 공기구멍의 반지름은 $160nm$ 이고, 주기(lattice constant)는 $460nm$ 이다. 제작을 위해 전자빔 리소그래피와 건식 및 습식 식각의 공정을 이용하였다. 특히 InGaAsP 4-pairs quantum wells 웨이퍼를 이용함으로써 높은 전자적 비선형성 효과를 기대할 수 있었다. 제작된 공진기는 FDTD 시뮬레이션을 통해 약 4200의 품위값을 가지는 것으로 계산된다. 제작된 광결정 공진기와 외부 광 장치와의 결합을 위해 가늘게 테이퍼링 된 광섬유를 박막형 광결정 공진기의 표면에 닿게 함으로써 결합 효율을 증가시켰다 (그림 2). 제작된 테이퍼-광섬유의 반지름과 곡률반경은 각각 $1.5\mu m$ 와 $50\mu m$ 으로 측정되었다.

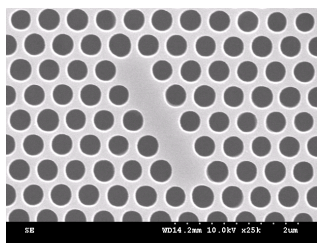


그림 1. 제작된 막대형 광결정 공진기.

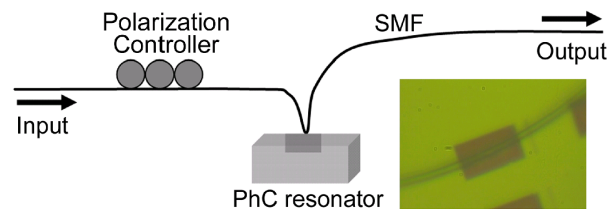


그림 2. 광쌍안정성을 측정하기 위한 실험장치.

낮은 입력 파워에 대한 투과 스펙트럼을 통해 제작된 공진기의 공진 파장을 확인할 수 있는데, 그림 3은 낮은 입력 파워에서부터 조금씩 파워를 증가해가면서 얻은 투과스펙트럼 결과이다. 이 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 낮은 입력 파워 ($8\mu W$)에 대한 투과 스펙트럼은 lorentzian line-shape을 가지는데, 이 결과를 통해 공진 파장은 $1610.2nm$ 이고 전체 품위값은 2200임을 알 수 있다. 또한 결합 효율은 약 20%의 값을 가지는 것으로

계산된다. 이 그림에서 증가된 입력파위에 대한 투과 스펙트럼을 살펴보면 공진 파장은 점점 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 공진기내 물질이 Quantum wells의 전자적 비선형성에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 약 $37\mu W$ 이상의 입력파위에서는 특정 파장에서 불연속적 스펙트럼 특성을 보이는데, 이 결과는 광 쌍안정성을 간접적으로 보여준다. 직접적으로 광 쌍안정성을 확인하기 위해 입력 신호를 $1610nm$ 의 부근의 파장으로 고정시키고 연속파 (continuous wave) 형태로 파워를 증가 및 감소시키면서 출력 파워의 특성을 관찰하였다 (그림 4). 그림에서 확인할 수 있듯이, 두 개의 뚜렷한 출력 파워가 특정 입력 파워 구간에서 존재하는 것을 확인할 수 있다. 특히 Detuning(δ)이 -1.724 값 이하에서는 광 쌍안정 구간이 나타나지 않는데, 이 값은 이론적 광 쌍안정 문턱값($\delta_0 = -\sqrt{3}$)과 거의 일치한다. 광 쌍안정 문턱값에 대한 최소 출력값은 $35\mu W$ 이고, 이 값은 그림 3에서 불연속 스펙트럼이 나타나기 시작하는 파워($37\mu W$)와 거의 일치함을 알 수 있다.

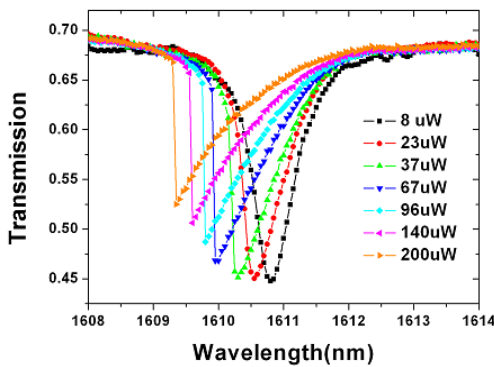


그림 3. 측정된 투과스펙트럼.

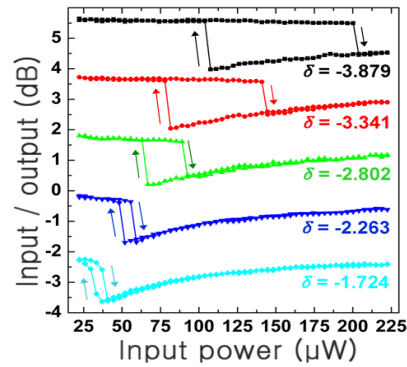


그림 4. 광쌍안정 곡선 (데시벨 스케일).

제작된 광결정 공진기의 광 쌍안정성을 바탕으로 구현한 광메모리 결과를 그림 5에 나타내었다. 파란색 점선은 입력 펄스를 나타내는 신호이고, 검정색 실선은 출력 신호를 나타낸다. 그림에서 출력신호는 처음 높은 상태를 유지하고 있다가 짧은 시간의 입력 펄스에 반응하여 아래의 상태로 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 다시 말해 입력 펄스 값을 기억하고 출력 값의 상태가 변화하는 것을 알 수 있다. 여기서, 기억을 위한 최소 입력 펄스의 에너지는 약 $75.4fJ$ 으로 측정되었다.

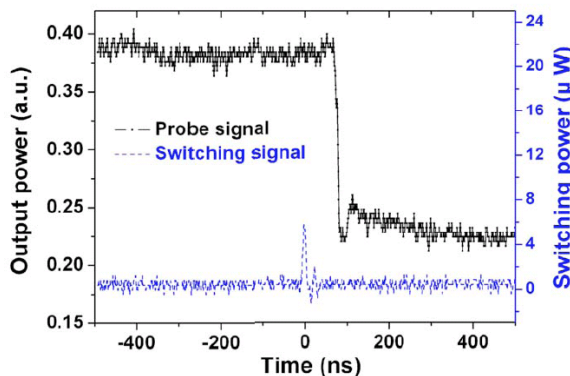


그림 5. 측정된 광메모리 결과.

1. I. K. Hwang et al, "Curved-microfiber coupling for photonic crystal light emitter," Appl. Phys. Lett. 87, 131107 (2005).
2. T. Tanabe et al, "Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip," Opt. Lett. 30, 2575 (2005).