

나노 프린팅 광결정 공진기 레이저

Nano-Printed Photonic-Crystal Laser

서민교, 강주형, 김명기, 안병현, 박홍규*, 이용희
 물리학과, 한국과학기술원 (KAIST), *고려대학교 물리학과
 minkyoo.seo@gmail.com

광결정 나노 공진기는 매우 높은 품위 값과 파장 정도 크기에 불과한 모드 부피를 가지고 있어 낮은 문턱 값 레이저⁽¹⁾⁽²⁾, 단일 광자원⁽³⁾, 양자 동역학 효과⁽⁴⁾, 광집적회로⁽⁵⁾ 등에 많이 이용되고 있다. 이러한 구현에 있어서 광결정 공진기의 공진 파장과 능동 매질의 방출 파장을 정밀히 일치시켜야 하는 동시에 공간적으로 광결정 공진기와 양자점 혹은 비선형 물질 같은 능동 매질이 최적의 결합을 할 수 있어야 한다. 공진 파장의 일치에 있어서는 많은 연구들이 진행되어온 것에 비해⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 광결정 나노 공진기를 원하는 위치에 형성하여 이득 매질과 공간적으로 최적의 결합을 하는 연구는 아직 미흡한 부분이 많다. 광결정 위에 Polymethyl metacrylate (PMMA)를 코팅하고 다시 전자빔 리소그래피를 하거나⁽⁸⁾ 자외선 레이저에 반응하는 폴리머를 이용한 방법⁽⁹⁾ 등이 제시되어 왔으나, 공정이 매우 복잡하거나 공간적 정밀성이 레이저의 파장 크기로 제한되는 단점을 안고 있다. 본 연구에서는 전자빔 유도 증착법 (Electron Beam Induced Deposition)⁽¹⁰⁾에 의한 나노 블록을 광결정 도파로의 원하는 부분에 정밀하게 형성하여 파장 정도 크기의 나노 프린팅 광결정 공진기 레이저를 구현하는데 성공하였다.

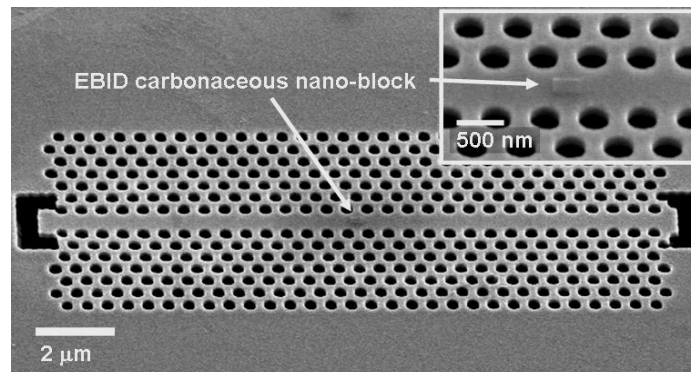


그림 1 전자빔 유도 증착법에 의한 나노 블록으로 형성된 광결정 나노 공진기의 전자 현미경 사진.

나노 프린팅 광결정 공진기 레이저의 제작 과정은 다음과 같다. InGaAsP 양자 우물을 가진 박막형 광결정 도파로를 제작한 후, 주사식 전자 현미경의 전자빔 유도를 이용하여 탄소질의 나노 블록을 광결정 도파로의 특정 위치에 형성한다 (그림 1). 이렇게 형성된 나노 블록은 블록이 형성된 지점의 굴절률의 증가를 가져온다. 이에 따라 블록이 있는 도파로 부분의 cutoff 파장이 없는 도파로 부분의 cutoff 파장에 비해 낮아지게 되며, 광자 포텐셜 우물 (Photonic potential well)을 형성하여 강한 공진 모드를 가지게 된다. 나노 프린팅 광결정 레이저의 광방출 이미지는 그림 2(a)와 같으며 공진기 영역에서부터의 강한 수직 광방출이 관찰된다. 이에 비해 나노 블록을 형성하기 전에는 도파로 모드만 존재하

여 그림 2(b)에서처럼 도파로 끝에서의 산란을 볼 수 있다. 즉 나노 블록의 형성으로 파장 정도 크기의 광결정 공진기 레이저가 원하는 곳에 효과적으로 구현된 것을 알 수 있다. 그림 2(c)와 2(d)는 유한차 시간영역 방법을 이용한 나노 프린팅 광결정 공진기의 전산 모사 결과이며 역시 실험 광방출 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 특히 수직 위 방향으로 효율적인 광방출을 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 나노 프린팅 광결정 공진기 레이저의 스펙트럼 측정과 유한차 시간 영역 전산 모사를 통해 파장 정도 크기를 가진 공진 모드가 광결정 도파로 모드에서 기인하여 형성됨을 알아내었다.

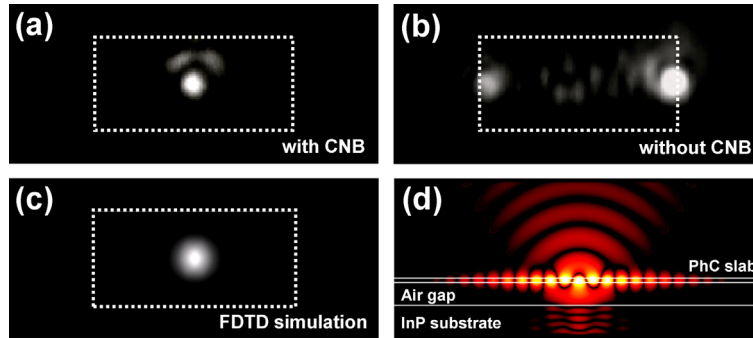


그림 2 (a) 나노 프린팅 광결정 공진 모드 레이저의 CCD 이미지. (b) 나노 블록이 없는 도파로 모드의 CCD 이미지 (c)(d) 나노 프린팅 광결정 공진기의 전산 모사 결과.

본 연구에서 제안 구현한 파장 정도 크기의 광결정 공진기는 나노 블록의 위치에 따라 자유롭게 그 위치가 결정되며, 나노 블록의 크기와 모양 위치를 조절함에 따라 광 방출 특성과 광 결합 그리고 품위 값 및 모드 부피를 자유자재로 조절하는 것이 가능하다. 이를 통해 양자점 같은 이득 매질과의 원활한 공간적 상호작용을 가능케 하며, 비선형 물질이나 금속의 전자빔 유도 증착을 통해 광결정 공진 모드와 물질이 보다 강하게 상호 작용하는 새로운 광소자의 제작이 가능할 것으로 기대된다

참고문헌

1. O. Painter, et al., *Science* 284, 1819 (1999).
2. H.-G. Park, et al., *Science* 305, 1444 (2004).
3. D. Englund, et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 013904 (2005).
4. K. Hennessy, et al., *Nature* 445, 896 (2007).
5. K. Nozaki, et al., *Appl. Phys. Lett.* 92, 021108 (2008).
6. K. Hennessy, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 87, 021108 (2005).
7. K. Hennessy, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 89, 041118 (2006).
8. S. Gardin, et al., *Opt. Express* 16, 6331 (2008).
9. P. El-Kallassi, et al., *J. Opt. Soc. Am. B* 25, 1562 (2008).
10. M. Kristian, et al., *Nano Lett.* 3, 1499 (2003).