

전류 구동 단일 결함 육각형 모드 광결정 레이저

Electrically-driven single-cell hexapole mode photonic crystal laser

서민교, 정광용, 양진규, 이용희

한국과학기술원 물리학과

b612@kaist.ac.kr

광결정 미소 공진기 레이저는 높은 품위 값(Quality factor)과 빛의 파장 정도 크기의 매우 작은 모드 부피 (mode volume)를 가지고 있어 양자 정보 (Quantum information) 및 양자 암호학 (quantum cryptography) 구현을 위한 단일 광자원 (single photon source)으로서 많이 연구되고 있다. 또한 양자 전기 역학 (quantum electrodynamics) 현상 및 양자 전산학 (quantum computation)을 위한 광자원으로서도 기대되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 최초의 전류 구동 단일 결함 광결정 레이저는 단일극 모드 (monopole mode)를 이용하여 구현되었다.⁽⁴⁾ 하지만 단일극 모드에서 방출되는 광자들은 매우 넓은 영역으로 발산되어 일반적인 광학 장비 특히 광섬유로 효과적으로 모아질 수 없다. 실제적인 양자 정보 구현을 위한 단일 광자원이 되기 위해서는 특정 방향으로 광자를 방출하여 대부분의 광자를 효율적으로 모을 수 있어야 한다. 단일 결함 광결정 공진기의 육각형 모드는 최근 간단한 변형으로 광자의 수직 방출이 가능함이 보고되어 효율적 단일 광자원 (efficient single photon source) 구현을 위한 중요 후보로 기대되고 있으며 단일극 모드에 비해 큰 품위 값을 가진다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 상온에서 동작하는 100 μ A의 매우 낮은 문턱 전류 (threshold current)의 전류 구동 단일 결함 광결정 육각형 모드 레이저를 제작 구현하였다.

전류 구동 단일 결함 광결정 레이저의 도식도와 전자 현미경 사진은 그림 1.과 같다. n-i-p로 도핑된 광결정 박막 중간에 InGaAsP 양자 우물 (quantum well)이 존재하며, 공진기 영역으로 전류를 주입하기 위해 저온 HCl 식각으로 200-300 nm 크기의 미세 기둥을 도입하였다. 전자 현미경 사진에서 공진기 영역 중앙의 하얀 영역이 미세 기둥의 투영 이미지이다. 미세 기둥은 공진 모드의 품위 값을 떨어트리지 않을 만큼 충분히 작되, 원활히 전류를 주입하고 구동 시 발생하는 열이 효과적으로 빠질 수 있는 크기가 되어야 한다. 본 연구에서 제작한 광결정 공진기는 450 nm의 주기를 가지며, 양자 우물의 전기 펌핑 발광 영역 (electro-luminescence spectrum)에 비축되던 육각형 모드와 이중 축퇴된 사각형 모드 (doubly degenerated quadrupole modes)가 존재한다. 육각형 모드는 공진기 중앙에 전기장 세기가 0인 영역이 넓게 존재하여 미소 전류 기둥 도입에 의해 품위 값 등이 크게 영향을 받지 않는데 비해 사각형 모드는 중앙에 센 전기장 분포로 인해 급격한 품위 값 감소를 보인다.

제작된 단일 결함 광결정 레이저는 상온에서 10 ns의 폭과 250 ns의 주기를 가진 전기 펄스로 구동된다. 그림 2. (a)에서와 같이 1537.8 nm에서 단일 육각형 모드로 레이저가 발진되며, 1518 nm부근을 확대하면 레이저 발진되지 않는 이중 축퇴된 사각형 모드들이 보인다. 그림 2. (b-c)에서 볼 수 있듯이 레이저 문턱 전류 값은 100 μ A로 측정되었으며 근적외선 카메라 (IR camera)를 이용하여 육각형 모드 레이저의 근접 장 이미지 (near-field image)를 얻었다. 특히 근접 장 이미지에서 중앙의 빛의 세기가 최소인 영역은 공진기 중앙에 세기가 0인 전기장 분포를 가지는 육각형 모드의 특성을 반영한다. 인가 전류 세기에 따른 육각형 모드의 스펙트럼 폭 (spectral line-width)의 변화를 살펴보면, 그림 2. (d)에서처럼 레이저 발진 문턱 전류 값 부근에서 스펙트럼 폭이 급격히 좁아진다. 레이저 발진 직전 70 μ A

에서의 스펙트럼 폭에서 추정된 제작된 레이저의 육각형 공진 모드의 품질 값은 약 3400이다. 반도체 레이저로서의 전기적 특성으로, 동작 전압 (turn-on voltage)은 0.9 V이며 레이저 발진시 전기 저항은 2.1 k Ω 이다. 단일 육각형 모드 레이저 발진을 확인하기 위한 또 하나의 방법으로 광결정 공진기 구조 전자현미경 사진을 그대로 도입한 유한 차 시간 영역 방법(contour finite-difference time-domain method) 전산 모사를 수행하였으며, 실험에서 얻어진 결과와 매우 잘 일치한다.

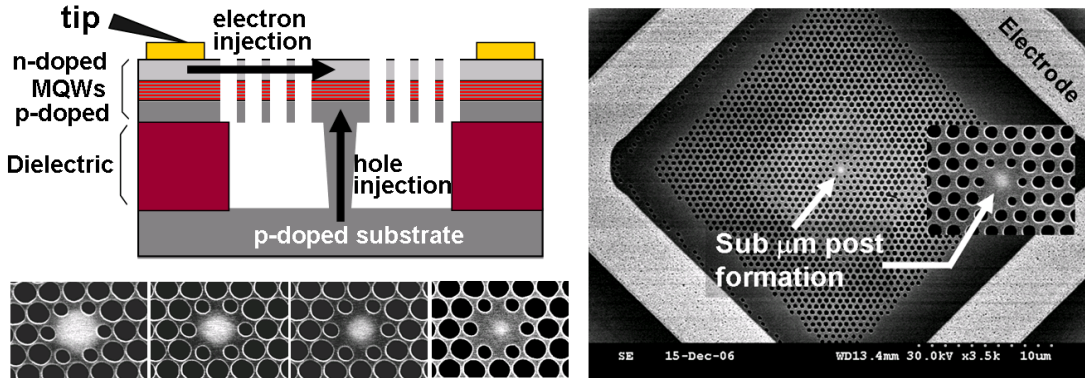


그림 1. 전류 구동 단일 결함 광결정 레이저의 개념도와 전자 현미경 사진

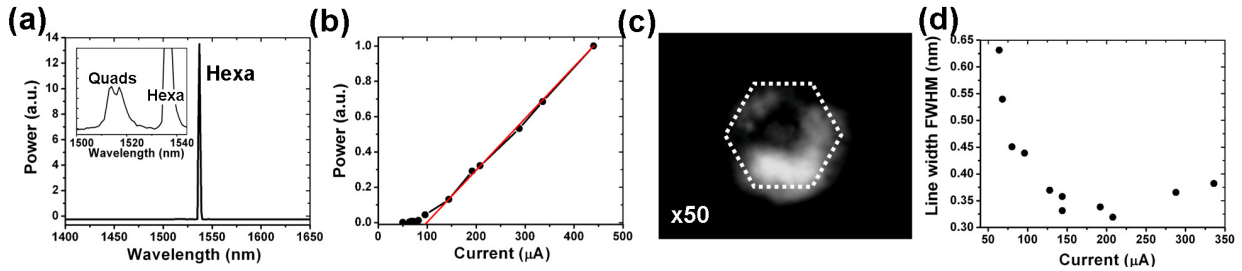


그림 2. (a) 단일 육각형 모드 레이저 발진 스펙트럼 (b) 100 μ A 레이저 발진 문턱 전류 (c) 근적외선 카메라 근접 장 이미지 (d) 인가 전류에 따른 육각형 모드 레이저 스펙트럼 폭의 변화

1. K. J. Vahala, "Optical microcavities," *Nature*, **424**, 839 (2003)
2. D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, B. Zhang, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Y. Yamamoto, and J. Vučković, "Controlling the Spontaneous Emission Rate of Single Quantum Dots in a Two-Dimensional Photonic Crystal," *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 013904 (2005).
3. T. Yoshie, A. Scherer, J. Hendrickson, G. Khitrova, H. M. Gibbs, G. Rupper, C. Ell, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, "Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot in a photonic crystal nanocavity," *Nature*, **432**, 200 (2004).
4. H.-G. Park, S.-H. Kim, S.-H. Kwon, Y.-G. Ju, J.-K. Yang, J.-H. Baek, S.-B. Kim, and Y.-H. Lee, "Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser," *Science*, **305**, 1444 (2004)
5. S.-H. Kim, S.-K. Kim, and Y.-H. Lee, "Vertical beaming of wavelength-scale photonic crystal resonators," *Phys. Rev. B*, **73**, 235117 (2006).