

광양자테 레이저의 시-공간 역학에 관한 연구

Study on spatio-temporal dynamics of photonic quantum ring laser

김동권, 김영천, 김승식, 권오대

포항공과대학교 전자전기공학과

maxwellr@postech.ac.kr

2차원 electron gas(2DEG) 상태에 존재하는 전자가 atomic defect, 두 개의 다른 물질 경계에서 발생하는 discontinuity⁽¹⁾ 및 양자점접합(quantum point contact)을 통해서 이동할 경우,⁽²⁾ 전자 분포가 de Broglie 파장크기를 갖는 chaos한 형태로 재정렬 됨은 이미 보고되었다. 이상의 현상은 전자의 움직임이 구조적인 discontinuity 및 구속으로 인한 양자효과에 의한 것이다. 본 논문에서는 반도체 마이크로공진기 레이저의 양자우물(QW) 이득물질에 구속된 전자 혹은 carrier의 무작위 분포가 레이저의 구조적인 특징 및 공진 optical field와의 상호작용으로 양자선(Qwire)으로의 carrier 재정렬이 유도됨을 계산한다.

Photonic quantum ring(PQR) 레이저는 cylindrical microdisk 레이저 형태로 상/하부 distribute Bragg reflector(DBR) 및 낮은 굴절률을 갖는 외부 경계, 그리고 활성층 내부에서 형성되는 Rayleigh band(W_{Rayleigh})에 의해 구속된 광파들이 3차원 Rayleigh-Fabry-Perot toroid 공진기 내에서 전반사를 통해 형성되는 whispering gallery(WG) 레이저다. 종래의 레이저와 비교해 1000배 이상의 낮은 전류에서 발진하며, 동작온도 영역에서 온도 증가에 따른 발진파장이 안정한 \sqrt{T} -의존성을 보인다. 특정 에너지 준위에 밀집된 carrier density가 온도에 대한 "energy spreading" 현상을 약화시키기 때문이다. 이러한 측정결과는 PQR 레이저가 공진기내에서 carrier의 정렬된 양자선에 의해 발진된 모드임을 보여주며, Rayleigh band 내에 존재하는 QW 상태의 캐리어를 $\lambda/2$ 의 간격을 갖는 동심원 형태의 양자선 다발로 가정한 모델을 통해 정확히 분석됨이 보고되었다.⁽³⁾ PQR 레이저 공진기 구조와 W_{Rayleigh} 안에 구속된 multi-chromatic 공진모드를 그림. 1(a, b)에 간략히 나타냈다. 다시 다파장 helix 모드를 포함하는 토로이드 공진기는 그림. 1(c)와 같이 field와 carrier의 적절한 외부 경계조건을 사용해 2차원 waveguide 공진기로 변형될 수 있다. 제안된 구조에서 field와 carrier의 분포는 Maxwell 방정식과 charge transport 수식을 self-consistent하게 적용/계산된다.⁽⁴⁾ 특히, pico 초 영역에서 charge transport 식의 시간 의존 diffusion constant는 generalized Langevin 식을 사용해 carrier의 재배치 현상중에 발생할 수 있는 충돌/마찰 상수를 고려해 처리되었다.⁽⁵⁾

계산에 사용된 공진기의 크기는 실린더형 PQR 레이저의 직경이 30 μm 소자에서 W_{Rayleigh} 가 $\sim 1 \mu\text{m}$ 의 값을 갖는 구조로 선택하였다. 주입전류는 P-DBR의 구조적인 두께가 확산상수보다 충분히 크므로 W_{Rayleigh} 영역에 균일한 주입을 가정했으며, 계산을 위한 초기 field와 carrier의 분포는 randomly uniform함을 초기조건으로 하였다. 그림. 2에 10 pico 초까지 시간에 따라 공간적으로 변하는 carrier와 field의 분포를 나타냈다. $t=0$ 인 시간에 randomly uniform한 carrier 분포가 시간이 지남에 따라 x축 방향을 따라 일정간격으로 정렬된 준(quasi) 양자선의 양상분을 형성함을 알 수 있다. 특히, longitudinal

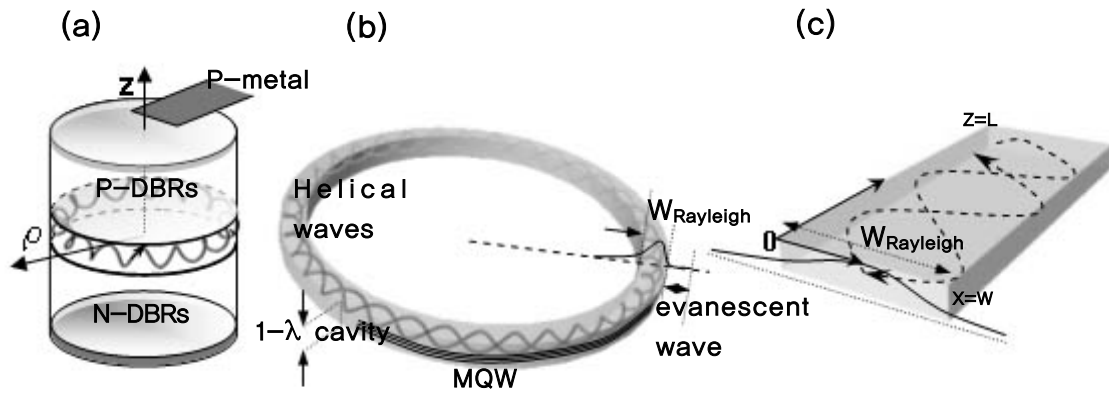


그림. 1 (a) 3D 토로이드 공진기안의 helix 다파장 모드를 보여주는 PQR 구조, (b) 토로이드 공진기의 확대모양과 (c) 간략화된 2차원 등가 공진기 구조.

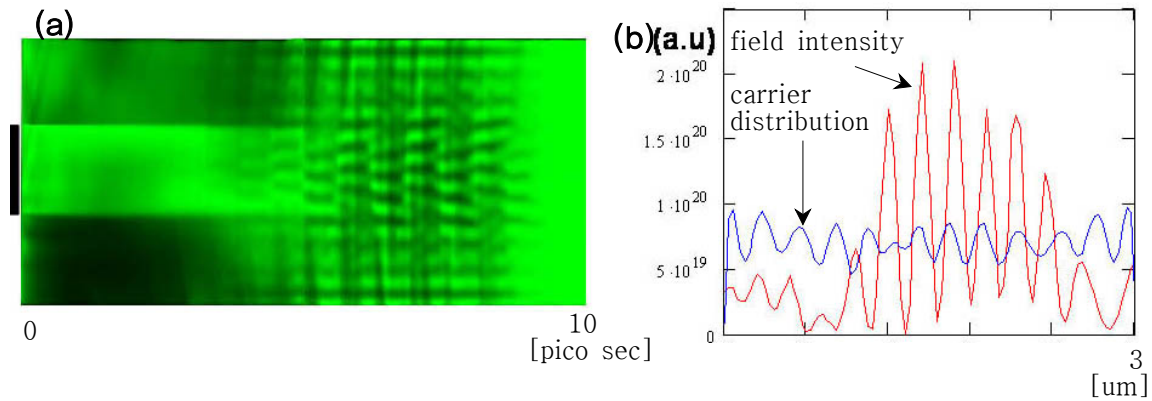


그림. 2 (a) 0~10 pico 초 시간영역에서 계산된 carrier 분포(왼쪽의 검은 막대는 전류주입 위치를 표시)와 (b) 5 pico 초에서의 field intensity와 carrier 분포.

방향(z)을 따라 이러한 구조가 연속이 되므로, 이는 toroid 공진기에서 동심원을 이루는 양자선 형태의 carrier 정렬을 얻을 수 있음을 의미한다. 8 pico초에서 대략 5.5개의 양자선의 개수는 정렬간격 181 nm(=1 um/5.5개)에 상응하며, 참고자료 3.에서 계산된 121 nm(= $\lambda/2n$; $\lambda=850$ nm, $n=3.5$)의 값에 근사적으로 접근한다.

1. M. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, "Imaging standing waves in a two-dimensional electron gas," Nature. vol. 363, 524-527 (1993).
2. M. A. Topinka, R. M. Westervelt, and E. J. Heller, "Imaging electron flow," Phys. Today. vol. xx, 47-52 (2003); M. A. Topinka, B. J. Leroy, R. M. Westervelt, S. E. J. Shaw, R. Fleischmann, E. J. Heller, K. D. Maranowski, and A. C. Gossard, "Coherent branched flow in a two-dimensional electron gas," Nature. vol. 410, 183-186 (2001).
3. J. C. Ahn, K. S. Kwak, B. H. Park, H. Y. Kang, J. Y. Kim, and O'Dae Kwon, "Photonic quantum ring," Phys. Rev. vol. 82, 536-539 (1999).
4. E. Gehrig, and O. Hess, "Dynamic filamentation and beam quality of quantum-dot lasers," Appl. Phys. Lett. vol. 84, 1650-1652 (2004).
5. H.Y. Kang and O'Dae Kwon, "Generalized transport coefficients for hot electron system," Progress in Statistical Physics (World Sci. Publication Co., 1998, Singapore).