

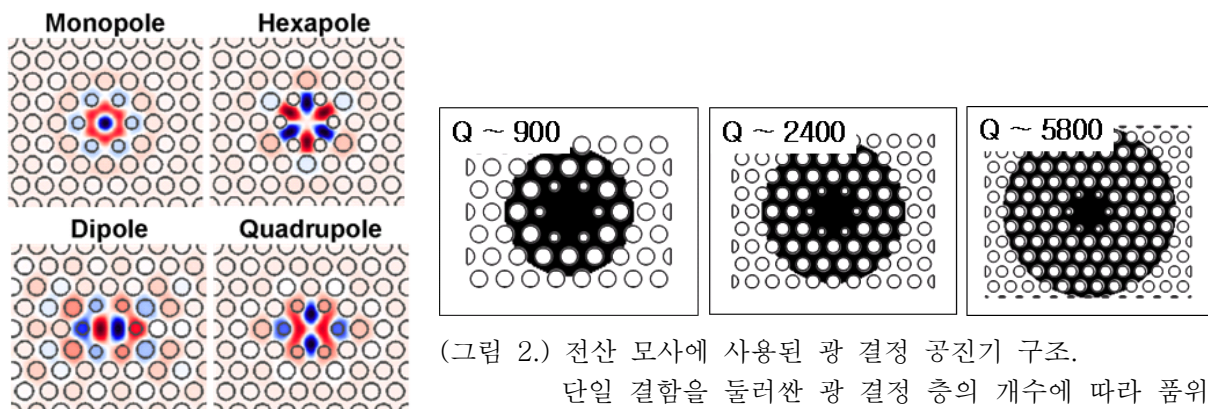
광 결정 단일 결함 레이저 공진기의 동적 특성 전산 모사

Dynamics Simulation of Photonic Crystal Single Cell Laser using Gain Finite-Difference Time-Domain Method

서민교, 이용희, 송계휴*
한국과학기술원 물리학과, *광주과학기술원 정보통신학과
b612@kaist.ac.kr

반도체 레이저의 동적 특성 (laser dynamics characteristics)을 연구하는데 있어 일반적으로 속도 방정식(rate equations)이 많이 이용되어 왔다. 하지만, 최근 다양하게 구현되고 있는 광 결정 공진기 레이저⁽¹⁻³⁾의 경우, 3차원적으로 복잡한 모드 특성으로 인해 단순한 수식적 분석만으로 동적 특성을 모두 설명하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 이득 매질로 로렌츠 분산 매질을 전산 모사 할 수 있는 유한 차 시간 영역 전산 모사 방법 (Finite-Difference Time-Domain method)과 carrier 밀도에 대한 속도 방정식을 self-consistent하게 결합하여,⁽⁴⁾ 광 결정 단일 결함 레이저의 동적 특성을 분석해 보았다.

전산 모사를 수행한 광 결정 공진기의 구조는 0.5a 두께의 박막 구조 (slab structure)에 (그림 1.)에서처럼 한 개의 공기구멍을 제거하여 단일 결함 (single defect)을 만들고, 가까운 공기구멍에 변화해 준 형태를 가진다. 여기서 a는 광 결정 구조의 주기 (lattice constant)이다. 이 공진기가 가지는 공진 모드 중 hexapole 모드를 선택하여 전산 모사를 수행하였다. 이득 매질 (gain media)은 광 결정 박막 내에 양자 우물처럼 도입되었으며, 각 계산 지점의 carrier 밀도가 transparent value 이상이면 전자기장에 대해 이득 매질의, 반대의 경우는 흡수 매질의 성질을 가지는 로렌츠 분산 관계를 따른다.



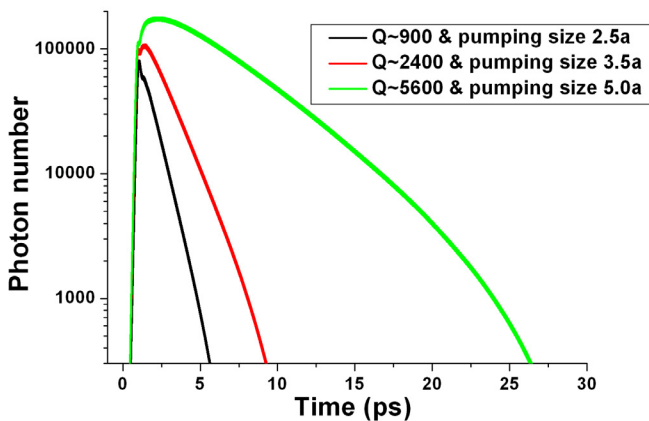
(그림 1.) 광결정 단일 결함 공진기 구조와 공진 모드

(그림 2.) 전산 모사에 사용된 광 결정 공진기 구조.
단일 결함을 둘러싼 광 결정 층의 개수에 따라 품질 인자(Q)가 변하며, 검은 색 영역은 펌핑 영역을 나타낸다.

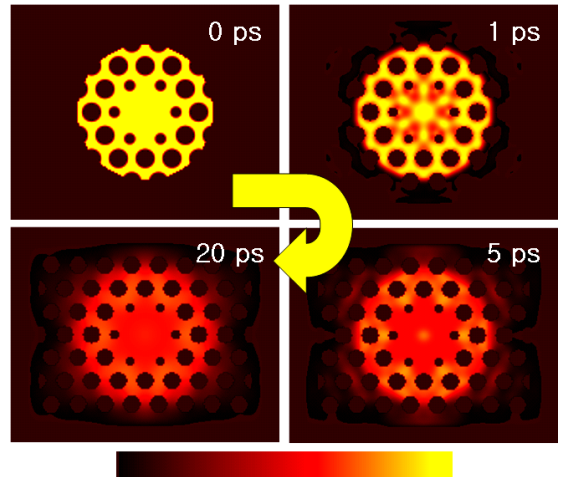
광 결정 공진기의 레이저 발전을 위한 펌핑으로, 이득 매질에 대해 (그림 2.)의 검은색 영역에 해당하는 부분의 초기 carrier 밀도를 transparent value에 1.67 배만큼 증가하였다. 이 값은 레이저 동작

문턱(laser threshold)을 넘어선 값이며, 초기 펌핑이 문턱보다 낮은 경우에 있어서는 레이저 발진 과정이 일어나지 않는다. 부가적인 펌핑은 더 이상 인가하지 않았으며, 이 전체적 펌핑 상황은 fs 레이저에 의한 펌핑을 상정하여 도입되었다.

동적 특성을 분석하기 위하여 공진기 내에 갇힌 공진 모드의 에너지 즉 광자수의 시간에 따른 변화를 (그림 3.)에서와 같이 log 그래프로 그려 살펴보았다. (그림 3.)은 품위 값 (Q factor)이 각각 900, 2400, 5800인 공진기들에 대해 펌핑 사이즈를 달리한 구조(그림 2.)의 전산 모사에 대한 결과이다. 우선 2ps 이하의 시간에서 일어나는 레이저 발진에 의해 광자수가 급속히 증가하는데, 그 속도는 공진기의 품위 값에 그다지 큰 영향을 받지 않는다. 이는 광 결정 단일 결합 공진기의 공진 모드에서 단일 결합에 전자기장이 강하게 집중되므로, 초기 레이저 발진 과정(< 2ps)에서 결합 영역에 있는 carrier를 집중적으로 소비하면서 급속한 자극 방출이 일어나고, 결합 영역 밖의 carrier들의 참여가 작기 때문이다. 시간에 따른 carrier 밀도의 변화 (그림 4.)를 보면, 레이저 발진에 의한 공진 모드의 빠른 증폭에 의해 hole burning (1ps 지점)이 일어나는 것을 볼 수 있으며, hexapole 모드의 전기장 세기가 센 곳에서 주로 일어난다. 레이저 발진 이후는 공진기내의 광자들이 외부로 계속해서 빠져나가며, 일반적인 분석에서와 같이 품위 값이 클수록 광자가 공진기내에 오래 살아남는 결과를 주는 것을 볼 수 있다. 하지만 품위 값이 큰 공진기의 경우라도 초기 펌핑 영역이 작으면, 펌핑되지 않은 영역은 흡수 매질로 작용하여 공진 모드가 느끼는 실제 품위 값을 떨어뜨리는 결과를 가져와 광자가 빨리 공진기를 빠져나가게 된다.



(그림 3.) 공진기 내에 갇힌 광자수의 시간적 변화



(그림 4.) 품위값 ~900 공진기에서의 시간에 따른 carrier 밀도 변화

[참고 문헌]

1. O. Painter, et. al., "Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser," *Science* **284**, 1819 (1999)
2. H. G. Park, et. al., "Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser," *Science* **305**, 1444 (2004).
3. H. G. Park, et. al., "Nondegenerate monopole-mode two dimensional photonic band gap laser," *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3032 (2001).
4. Min-Kyo Seo, et. al., "Nonlinear dispersive three-dimensional finite-difference time-domain analysis for photonic-crystal lasers," *Opt. Exp.* **13**, 9645 (2005)