

양자점이 결합된 광결정 공진기의 Rabi Splitting에 관한 전산 모사

Rabi Splitting Simulation in Photonic Crystal Cavity coupled with Quantum Dot

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

광결정 공진기와 미소 원반 공진기와 같은 미소 공진기는 높은 품위값(Q)과 작은 공진 모드 부피(mode volume)를 가지고 있어, 매우 강한 전자기장을 작은 공진 영역에 집중시킬 수 있다. 이러한 미소 공진기의 특성은 양자 우물이나 양자점(quantum dot)과 같은 이득 매질과 결합(coupling)하여 공진기 양자 전기 역학(cavity quantum electro-dynamics)에서 예견되는 현상들을 보이게 된다.⁽¹⁾ 공진기 양자 전기 역학 현상에는 공진 모드와 이득 매질의 결합 정도에 따라 결합 세기 (coupling strength)가 이득 매질의 감쇄나 공진기의 감쇄보다 큰 상태를 만족하는 strong coupling과 보다 약한 결합 세기를 가지는 weak coupling의 두 영역으로 나뉜다. strong coupling 영역에서 이득 매질의 준위차에 해당하는 주파수와 공진 모드의 공진 주파수가 일치하는 공명 조건에 가까워지면, 이득 매질과 공진 모드 사이에서 Rabi 진동이 일어나게 되며, 이는 주파수 영역(frequency domain)에서 Rabi splitting으로 나타난다. Rabi splitting은 원자 준위와 매우 높은 품위값을 가지는 공진기에서와 양자점과 반도체 미소 공진기에서 실험적으로 보여 졌다.⁽²⁾⁽³⁾

그 동안 Rabi splitting에 대한 이론적 분석에 있어 준 고전적인 진동자 모델이나 양자 역학적인 진동자 모델을 사용한 간단한 수식적 분석이 많이 사용되었다.⁽⁴⁾ 하지만 수식적 분석 방법은 공진 모드 특성이 복잡한 광결정 공진기 같은 미소 공진기의 경우에는 충분한 분석을 제공하지 못한다. 이러한 이유로 광결정 공진기와 양자점의 strong coupling의 전산 모사를 위한 새로운 방법이 필요하다.

광결정 공진기의 모드 특성의 분석에는 유한차 시간영역 방법(Finite-Difference Time-Domain method)이 많이 사용된다. 이득 매질을 기술할 수 있는 로렌츠 분산 관계(Lorentz-dispersion)를 도입한 유한차 시간영역 전산 모사에 carrier에 대한 속도 방정식(carrier rate equation)을 결합하여 만든 새로운 유한차 시간영역 전산 모사 방법⁽⁵⁾을 이용하면 좀 더 완벽한 strong coupling 영역에서의 Rabi splitting 전산 모사를 수행할 수 있다.

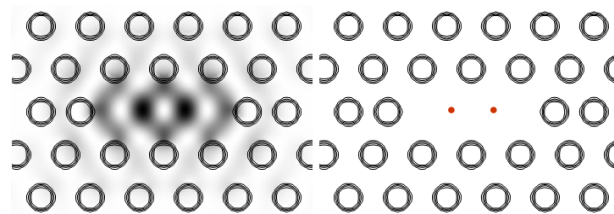


그림 1. (좌측) 광결정 막대기형 공진기와 공진 모드의 전기장 세기 분포, (우측) 가정된 공진기 내의 양자점

본 논문의 전산 모사에 사용한 광결정 공진기 구조는 (그림 1.)에서처럼 두 개의 공기구멍을 제거해 만든 막대기형 공진기에 막대형 공진영역 끝부분의 공기구멍을 약간 밀어 만든 구조로 193.2THz(~1550nm)의 공진 주파수를 가진다. 이 광결정 공진기 구조의 전기장 세기의 분포는 (그림 1.)에서와 같으며, 전기장이 가장 센 영

역이 반도체 매질 내에 존재한다. 공진 모드와 양자점 사이의 결합을 극대화 하기 위해, 양자점을 전기장이 가장 센 영역에 위치 시켜 전산 모사를 수행하였다. 전산 모사에 사용된 양자점의 쌍극자 모멘텀은 12.5 enm 정도의 값으로 가정되었다. 계산 시간 단축을 위해 대칭성을 사용하였고 그로 인해 두 개의 양자점이 광결정 공진기 내에 도입되었다. 도입한 광결정 공진기의 품위값과 모드 부피는 각각 48,000과 $0.68(\lambda/n)^3$ 이며, 양자점의 carrier 감쇄 인자는 0.01THz로 가정되었다. 이 값들과 위의 쌍극자 모멘텀 값은 전산 모사를 수행한 구조가 strong coupling 영역에 있을 조건을 만족한다.⁽⁴⁾

언급된 구조에 초기조건으로 광자 2개 정도 세기의 공진 모드를 만들고, 이후 양자점과 상호 작용 시켜 strong coupling 효과를 전산 모사하였다. 그 결과로 (그림 2.)에서처럼 공명 조건을 만족 시킬 때, 양자점 하나 당 들뜬 carrier의 수와 공진기내의 광자 수 사이에 Rabi 진동이 강하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 또한 양자점의 공진 주파수를 바꿔가며 전산 모사를 수행하면 (그림 3.)에서 볼 수 있듯이, 양자점의 중심 주파수를 바꿔가며 양자점에 해당하는 peak를 공진 모드에 해당하는 peak와 교차시킬 때, 두 peak가 서로 반교차(anti-crossing)하며, 이는 Rabi splitting의 중요한 결과의 하나이다. 공명 상태에서 Rabi splitting은 ~0.5THz 정도이며 (그림 3.), 단순 수식적 분석⁽⁴⁾에서 얻은 양자점과 공진모드의 극대 결합 시 Rabi splitting값 (<1.8THz)과 잘 부합한다.

새로운 유한차 시간 영역 전산 모사를 이용하여, 양자점이 결합된 광결정 공진기의 Rabi splitting을 전산 모사 할 수 있었다. 이 방법을 이용하여 양자점의 위치와 편광적 특성 따른 Rabi splitting의 변화 또한 전산 모사 할 수 있으며, 다른 많은 공진기 양자 전기 역학적 효과를 전산 모사 분석이 가능하다고 기대된다.

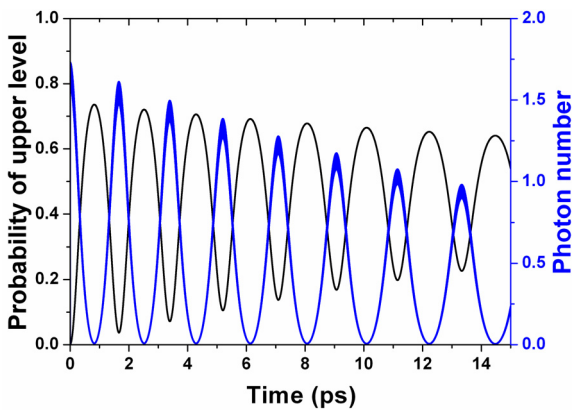


그림 2. 공명 상태에서의 양자점 하나당 들뜬 carrier 수와 공진기내의 광자수의 Rabi 진동

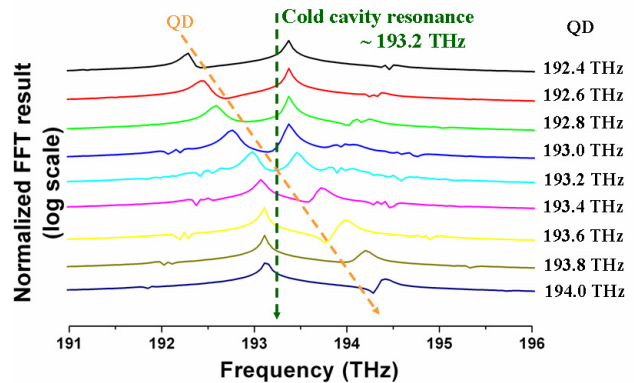


그림 3. 양자점 준위의 중심 주파수 변화에 따른 Rabi splitting과 반교차(anti-crossing) 효과 전산 모사 결과

1. Kerry J. Vahala, "Optical microcavities," *Nature* **424**, 839 (2003)
2. C. J. Hood, et. al., "Real-Time Cavity QED with Single Atoms," *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4157 (1998)
3. J. P. Reithmaier, et. al., "Strong coupling in a single quantum dot-semiconductor microcavity system," *Nature* **432**, 197 (2004)
4. S. Rudin, et. al., "Oscillator model for vacuum Rabi splitting in microcavities," *Phys. Rev. B* **59**, 10227 (1999)
5. Min-Kyo Seo, et. al., "Nonlinear dispersive three-dimensional finite-difference time-domain analysis for photonic-crystal lasers," *Opt. Exp.* **13**, 9645 (2005)