

# 특집 ■ Quantum Dot

## 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 캐리어 동력학에 대한 이해

김경호\*

### 1. 서론

반도체 양자점은 그림 1과 같이 삼차원으로 둘러싸인 전위장벽에 의해 양자점 내부 전자 및 정공이 삼차원적으로 속박되어 있고, 양자점 내부 캐리어는 델타함수 형태의 density of states를 갖는다. 반도체 양자점 기반 레이저/광증폭기에 대한 연구는 양자점 구조를 반도체 레이저의 광학 이득층으로 사용할 경우 양자우물이나 양자선 구조를 광학 이득층으로 사용한 경우에 비해 매우 낮은 문턱전류(threshold current), 매우 높은 열안정성을 얻을 수 있음을 이론적으로 예측한, 1982년 일본 동경대 Arakawa 교수 연구그룹의 논문에서 시작되었다. [1] 그 이후로 많은 연구자들이 에칭공정 등의 방법으로 반도체 양자점 기반 레이저를 구현하려고 했으나, 에칭공정을 통해 발생하는 양자점 표면의 defect state들에 의해 전류손실이 커지는 문제를 해결하지 못했다. 이러한 defect state가 없는 양자점 성장의 문제는 1994년 독일 베를린 공대 Bimberg 교수 연구그룹에서 자기조립(self-assembled) 방법으로 성장된 반도체 양자점을 광학 이득층으로 사용하여 상온에서 발진하는 반도체 양자점 기반 레이저에 대한 연구결과를 발표함으로써 해결할 수 있었다. [2] 그 이후 자기조립 방법을 이용한 III-V족 화합물 반도체 양자점 레이저에 대한 연구결과

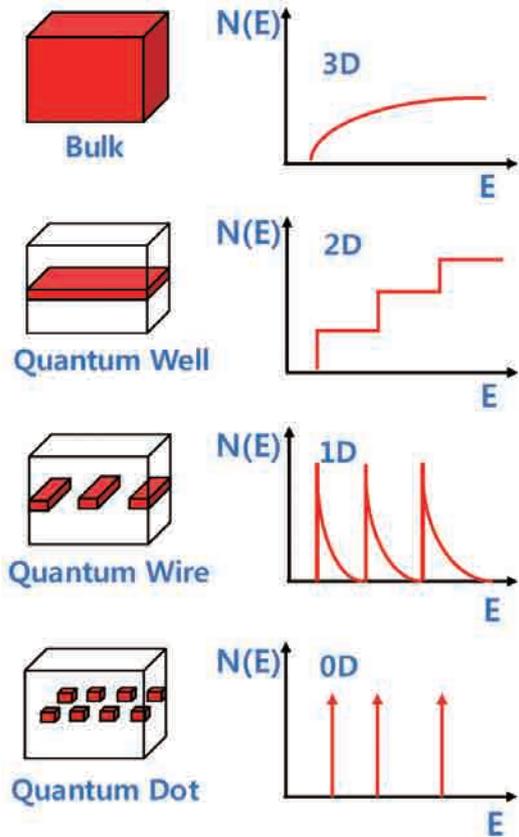


그림 1. bulk, 양자우물, 양자선, 양자점의 density of states

\* 경희대학교 정보디스플레이학과

## 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 캐리어 동력학에 대한 이해

들은 획기적으로 증가하였으며, 응용의 범위가 양자점 광증폭기, 양자점 단일광자광원 등으로 확산되었다. [3]

본 고에서는 III-V족 화합물 반도체 양자점 레이저/광증폭기에서 발생하는 캐리어 동력학에 대해 소개하고자 한다. 반도체 양자점 레이저/광증폭기는 기존의 양자우물 기반 레이저/광증폭기에 비하여 여러 가지 우수한 발광특성을 나타냄이 밝혀졌다. 양자점 레이저의 경우 매우 낮은 문턱전류, 온도 변화에 무관한 문턱전류, 매우 낮은 처핑 특성을 나타내며, 양자점 광증폭기의 경우 넓은 광증폭 파장대역, 왜곡이 없는 초고속 동작 속도 등이 보고 되었다. [3] 그러나, 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 이러한 우수한 특성을 가능하게 하는 캐리어 동력학은 완전하게 이해되지 않았다. 본 고에서는 자기조립 양자점의 캐리어 동력학 특성에 대해 크게 세 가지로 나누어서 소개할 것이며, coupled rate equation을 이용한 양자점 레이저/광증폭기 캐리어 동력학에 대한 이론적인 모델에 대해서도 살펴볼 것이다.

### 2. 반도체 양자점의 캐리어 동력학

그림 2는 자기조립 방법에 의해 형성된 반도체 양자점의 개념도를 나타낸 것이다. GaAs와 같은 배리어 물질 위에 격자상수가 크게 차이가 나는 In(Ga)As와 같은 박막을 증착할 경우, 격자상수 차이에 의한 스트레인의 영향으로 임계 두께(critical thickness)이상에서는 In(Ga)As가 이차원 박막층을 형성하지 못하고, 불균일한 크기 및 모양을 가지는 자기조립 양자점이 형성된다. 이러한 증착법을 Stranski-Krastanov 모드라고 하며, 이렇게 형성된 반도체 양자점들은 표면에 defect state가 없이 형성된다. [4]

자기조립 방법에 의해 형성된 양자점의 캐리어 주입 속도 및 발광세기는 인가된 전류밀도 및 양자점의 균일도 등에 따라 많은 차이를 보인다. 양자점 캐리어 동력

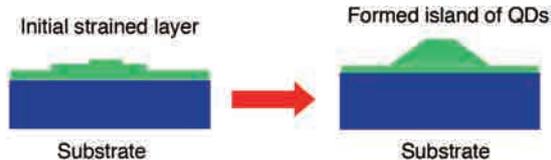


그림 2. 자기조립 양자점의 형성

학에 관해 연구되었던 주요 이슈는 다음과 같다.

### 가. “Phonon bottleneck” 문제

그림 3은 반도체 양자점으로 캐리어가 주입되는 메커니즘으로서 phonon process와 Auger process를 나타내고 있다. [5] 전극에서 주입된 캐리어는 일단 이차원 양자우물 구조를 가지는 wetting layer에 포획된다. 주입되는 캐리어의 밀도가 낮을 때는, 열에너지의 양자적 단위인 phonon을 방출하면서 wetting layer에서 양자점 에너지 상태로 캐리어가 주입된다. 그런데, III-V족 화합물 반도체에서는 일정한 열에너지 값( $\hbar\omega_{LO} \approx 30 \text{ meV}$ )을 갖는 polar optical phonon의 방출이 주요한 phonon process가 된다. 양자점 내부의 에너지 준위의 차이가 polar optical phonon 에너지와 일치하지 않을 경우 에너지보존이 성립되지 않는다. 따라서, wetting layer로 캐리어가 포획되어도 양자점 내부로 캐리어가 주입되지 않으며, 이를 “phonon bottleneck” 문제라고 한다. 그런데, 주입되는 캐리어의 밀도가 높을 때는, Auger process를 통해 wetting layer에 포획된 캐리어가 양자점 내부 에너지 상태로 주입된다. Auger process를 통해서 wetting layer에 있는 캐리어가 연속적인 에너지 방출하면서 양자점의 불연속 에너지 준위 상태로 이동이 가능하므로 “phonon bottleneck”과 같은 문제가 발생하지 않는다.

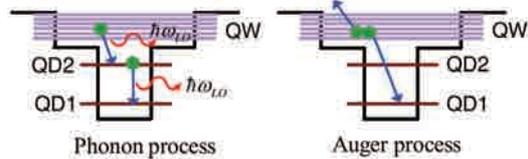


그림 3. 반도체 양자점 캐리어 주입 메커니즘

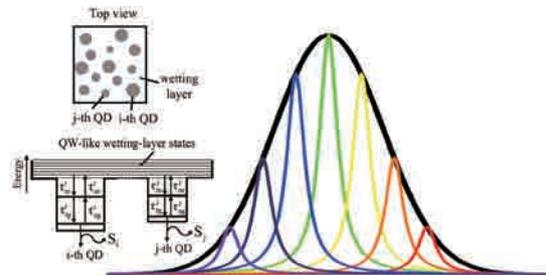
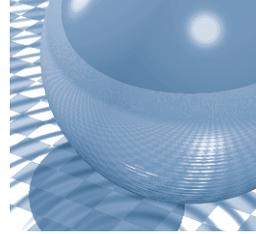


그림 4. 자기조립 양자점의 inhomogeneous gain broadening



## 나. Inhomogeneous gain broadening

자기조립 방법을 통해 형성된 반도체 양자점은 그 크기와 모양 등이 불균일하기 때문에 각각의 양자점 에너지 준위도 달라진다. 또한, 양자점들은 공간적으로 분리되어 있어서 양자점 상호간의 직접적인 캐리어의 이동은 거의 발생하지 않으며, wetting layer를 통해 간접적이고 느리게 양자점 상호간의 캐리어 이동이 가능하다. 따라서, 크기나 모양이 서로 다른 양자점들은 독립적으로 광방출에 기여할 수 있고, inhomogeneous gain broadening 특성을 보인다. 일반적으로 자기조립 양자점의 크기 및 모양의 불균일도는 가우스 함수 분포를 따르며, 이러한 경우의 inhomogeneous gain spectrum이 그림 4에 나타나 있다. 자기조립 양자점의 inhomogeneous gain broadening이 커질 경우, 최대 광학이득 값을 낮추기 때문에 양자점 레이저의 문턱전류를 높이는 부정적인 영향을 미친다. 이와 반대로 양자점 광증폭기의 경우, inhomogeneous gain broadening의 증가는 광증폭 파장대역을 넓게 하는 긍정적인 방향으로 작용한다.

## 다. Ultrafast gain recovery

반도체 광증폭기의 초고속 동작 특성은 캐리어의 소모를 통한 광증폭이 일어난 이후, 캐리어가 다시 채워지는 시간인 gain recovery time에 의해 결정된다. Ultrafast pump-probe pulse 실험결과에 따르면, 양자점 광증폭기는 기존의 양자우물 광증폭기에 비해 1 ps이하의 초고속 gain recovery time을 가지는 장점이 보고 되었다. [6] 그러나, 양자점 광증폭기는 gain recovery time에 비해 phase recovery time은 ~ 100 ps 이상으로 매우 느린 특성을 보였다. [7] 또한, 인가된 전류 밀도가 낮을 경우 양자점 광증폭기는 양자우물 광증폭기보다 느린 gain recovery time 특성을 보였다. [8] 이러한 양자점 광증폭기만의 고유한 carrier recovery dynamics는 양자점 기저상태의 carrier reservoir의 역할을 수행하는 양자점 들뜬 상태에 캐리어가 채워짐의 유무에 따라 결정됨이 밝혀

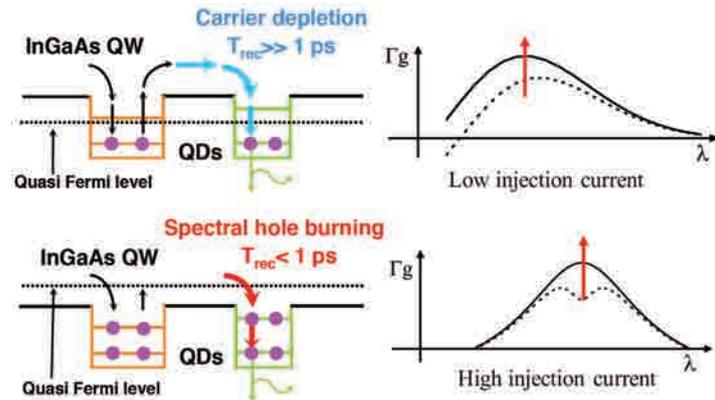


그림 5. 인가된 전류 밀도에 따른 양자점 광증폭기의 gain recovery 메커니즘

졌다. [9]

그림 5는 인가된 전류 밀도에 따른 양자점 광증폭기의 gain recovery 메커니즘을 나타낸다. 인가된 전류 밀도가 낮을 경우 양자점 들뜬 상태에는 캐리어가 채워지지 않아서, gain recovery를 위해서는 다른 양자점의 캐리어가 공통된 wetting layer를 통해 공급되어야 한다. 이러한 과정은 벌크나 양자우물 광증폭기에서 일어나는 total carrier depletion process와 동일하며, gain recovery time은 ~ 100 ps 이상으로 매우 느린 값을 갖는다. 이와 반대로 인가된 전류 밀도가 높을 경우 양자점 들뜬 상태에 캐리어가 채워져 있어서, 광증폭이 발생한 동일한 양자점의 들뜬 상태에서 기저 상태로 1 ps이하의 빠른 속도로 캐리어가 공급되며, 이러한 현상을 spectral hole burning이라 부른다. 따라서, 양자점 광증폭기로부터 ultrafast gain recovery 특성을 얻기 위해서는 양자점 들뜬 상태까지 충분히 캐리어가 채워질 수 있도록 높은 전류밀도 영역에서 동작시켜야 한다.

## 3. Coupled rate equation 기반 양자점 레이저/광증폭기 모델링

자기조립 양자점 기반 레이저/광증폭기의 캐리어 동역학을 이론적으로 모델링하기 위해서 coupled rate equation이 사용되고 있다. [10-15] 그림 6은 coupled rate equation model의 개념도를 나타내고 있다. 자기조립 양자점의 inhomogeneous gain broadening을 나타내

## 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 캐리어 동력학에 대한 이해

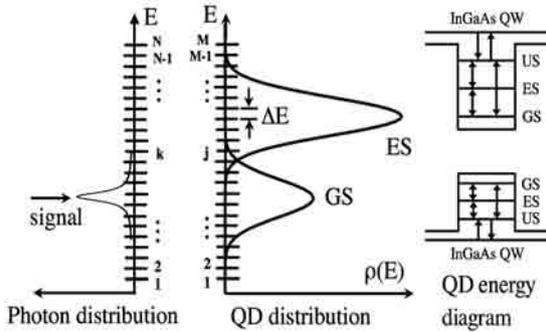


그림 6. Coupled rate equation model의 개념도

기 위해 가우스 함수 분포에 따라 양자점을 E만큼의 에너지 간격을 가지는 M개의 작은 그룹으로 나눈다. 또한, 각각의 양자점 그룹에서 발광되는 광자의 에너지를 N개의 작은 그룹으로 나누며, 양자점에서 광자방출은 homogeneous broadening을 고려하여 Lorentzian line-shape을 가지도록 한다. 이렇게 나뉘어진 양자점 그룹과 광자 그룹간의 상호 작용으로 양자점 레이저 및 광증폭기의 캐리어 동력학 및 광방출 특성을 모델링 할 수 있다.

그림 7은 1.3 $\mu\text{m}$  파장 대역의 ultrafast pump-probe pulse가 양자점 광증폭기에 인가되었을 때 발생하는 gain/phase recovery dynamics 변화를 coupled rate equation의 수치해석을 통해 계산한 결과를 나타내고 있다. [13] 양자점의 기저 상태에 해당하는 1.3 $\mu\text{m}$  파장영역에서는 1 ps 이내로 매우 빠르게 gain recovery가 이루어지며, spectral hole burning에 의해 양자점의 들뜬 상태에 해당하는 1.2 $\mu\text{m}$  파장 대역에서도 매우 빠른 gain recovery가 발생한다. 이와는 반대로 phase recovery는 1.1~1.4 $\mu\text{m}$  파장 대역

전체에 걸쳐서 매우 느리게 일어나고 있으며, 이는 실험 결과와도 일치한다. [7] 그림 8은 양자점의 GS(ground state), ES(excited state), US(upper state)에서 phase recovery 계산 결과를 나타낸 것으로, gain recovery와는 다른 양상을 보임을 알 수 있다. [13]

### 4. 결론

본 고에서는 III-V족 화합물 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 캐리어 동력학에 대하여 개괄하였다. 자기조립 반도체 양자점의 캐리어 동력학의 특성을 ‘phonon bottleneck’, ‘inhomogeneous gain broadening’, ‘ultrafast gain recovery’의 세 가지 관점에서 살펴 보았으며, 이것들이 반도체 양자점 레이저/광증폭기의 성능에 미치는 영향에 대해 설명하였다. 마지막으로 자기조립 양자점 레이저/광증폭기의 캐리어 동력학을 예측하기 위한 coupled rate equation 모델을 소개하였다. 반도체 양자점의 캐리어 동력학에 대한 연구는 양자점의 동작원리에 대한 근본적인 이해를 바탕으로 양자점 레이저/광증폭기의 성능향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

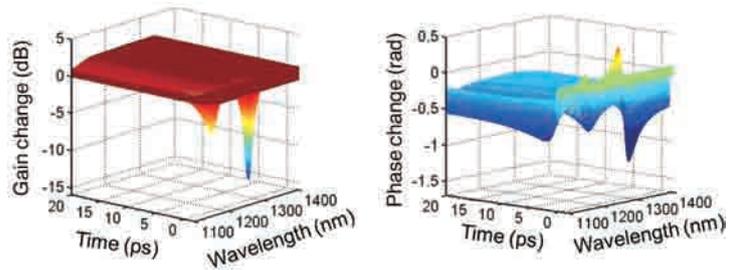


그림 7. 양자점 광증폭기에서 ultrafast gain/phase recovery 계산 결과 (참고문헌 [13])

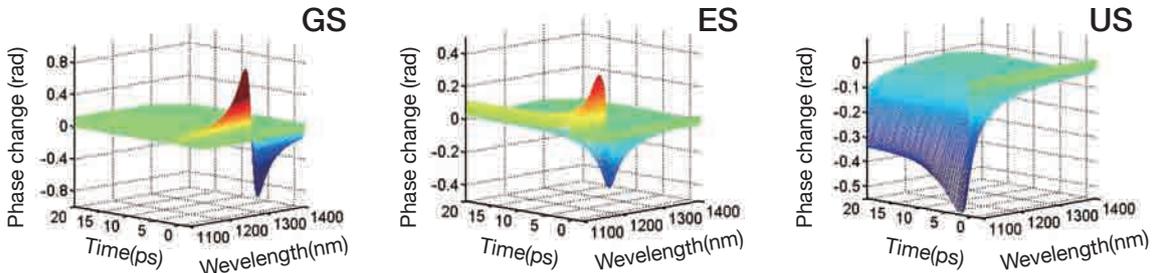
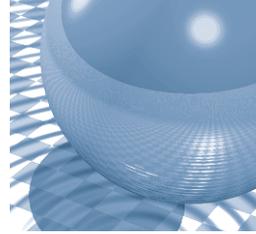


그림 8. 양자점 광증폭기에서 양자점의 GS(ground state), ES(excited state), US(upper state)에서의 phase recovery 계산 결과 (참고문헌 [13])



## 참고문헌

- [1] Y. Arakawa and H. Sakaki, "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current," *Appl. Phys. Lett.* 40, 939 (1982).
- [2] N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gosele, and J. Heydenreich, "Low threshold, large To injection laser emission from (InGa)As quantum dots," *Electron. Lett.* 30, 1416 (1994).
- [3] D. Bimberg and U. W. Pohl, "Quantum dots: promises and accomplishments," *Mater. Today* 14, 388 (2011).
- [4] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbaars, and P. M. Petroff, "Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces," *Appl. Phys. Lett.* 63, 3203 (1993).
- [5] B. Ohnesorge, M. Albrecht, J. Oshinowo, A. Forchel, and Y. Arakawa, "Rapid carrier relaxation in self-assembled  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum dots," *Phys. Rev. B* 54, 11532 (1996).
- [6] P. Borri, S. Schneider, W. Langbein, and D. Bimberg, "Ultrafast carrier dynamics in InGaAs quantum dot materials and devices," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8, S33 (2006).
- [7] T. Vallaitis, C. Koos, R. Bonk, W. Freude, M. Laemmlin, C. Meuer, D. Bimberg, and J. Leuthold, "Slow and fast dynamics of gain and phase in a quantum dot semiconductor optical amplifier," *Opt. Express* 16, 170 (2008).
- [8] J. Kim and S. L. Chuang, "Small-signal cross-gain modulation of quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 18, 2538 (2006).
- [9] J. Kim, M. Laemmlin, C. Meuer, D. Bimberg, and G. Eisenstein, "Static gain saturation model of quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.* 44, 658 (2008).
- [10] M. Sugawara, K. Mukai, Y. Nakata, H. Ishikawa, and A. Sakamoto, "Effect of homogeneous broadening of optical gain on lasing spectra in self-assembled  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum dot lasers," *Phys. Rev. B* 61, 7595 (2000).
- [11] M. Sugawara, H. Ebe, N. Hatori, M. Ishida, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, and Y. Nakata, "Theory of optical signal amplification and processing by quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *Phys. Rev. B* 69, 235332 (2004).
- [12] J. Kim, C. Meuer, D. Bimberg, and G. Eisenstein, "Role of carrier reservoirs on the slow phase recovery of quantum dot semiconductor optical amplifiers," *Appl. Phys. Lett.* 94, 041112 (2009).
- [13] J. Kim, C. Meuer, D. Bimberg, and G. Eisenstein, "Numerical simulation of temporal and spectral variation of gain and phase recovery in quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.* 46, 405 (2010).
- [14] J. Kim, "Influence of optical pumping wavelength on the ultrafast gain and phase recovery acceleration of quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *J. Opt.* 15, 105402 (2013).
- [15] J. Lee, B. Joen, J. Kim, D. Lee, "Microscopic mechanism underlying double-state lasing in an InAs/GaAs quantum dot laser diode elucidated using coupled rate equations and the spontaneous emission recorded from a window structure" *Opt. Express* 23, 31682 (2015).

## 약력



### 김정호

김정호교수는 2006년 5월 University of Illinois at Urbana-Champaign 전기컴퓨터 공학과에서 박사 학위를 취득하였고, 2006년 6월부터 2008년 7월까지 박사후 연구원 과정으로 독일 베를린공대 Bimberg 교수 연구그룹에서 양자점 레이저/광증폭기에 대한 연구를 수행하였다. 현재 경희대학교 정보디스플레이학과 부교수로 재직 중이며, 연구 관심분야는 OLED/태양전지, 양자점 광소자, 양자포획레이저 등에 대한 광전자 특성 수치해석 및 설계이다.