

과장대역폭이 넓은 고휘도 발광소자를 위한 Chirped 양자점 구조의 광/전기 특성 분석

한일기*

한국과학기술연구원, 나노소자연구센터 서울 136-791

(2009년 7월 31일 받음, 2009년 9월 1일 수정, 2009년 9월 2일 확정)

크기가 다른 양자점 (chirped 양자점) 구조에 대하여 전기발광 (Electroluminescence, EL) 특성과 광발광 (Photoluminescence, PL) 특성을 측정하고 비교 분석하였다. PL 특성에서는 양자점의 기저준위에 의한 피크가 우세하게 나타난 반면, EL 특성에서는 여기준위에 의한 특성이 우세하게 나타났다. 이와 같은 특성비교로부터 기저준위도 EL 특성에 영향을 미칠 수 있도록 chirped 양자점 구조를 설계하면 과장대역폭이 더욱 넓은 고휘도 발광소자 개발이 가능할 것임을 제안하였다.

주제어 : 고휘도 발광소자, Chirped 양자점, 광발광 (Photoluminescence), 전기발광 (Electroluminescence)

I. 서 론

양자점 (quantum dots)을 기반으로 한 광소자는 양자우물 기반의 광소자와 비교하여 소자의 성능을 향상시킬 것이라고 기대되어 왔고 또한 몇몇 광소자의 경우에 특성의 향상이 보고되었다. 예를 들어, 양자점을 활성층으로 이용하여 동작온도의 증가에 따른 문턱전류의 증가폭이 상대적으로 작아지고, 높은 주입전류에서도 광출력의 감소가 작아지고, 10 Gbps 까지 고속 동작하는 레이저 다이오드가 보고되었다 [1,2]. 또한 기존 양자우물 구조에서 문턱전류 밀도가 45A/cm²인 것에 비하여 양자점을 사용하여 16A/cm²로 감소시킨 결과도 보고되었다 [3].

한편 양자점의 크기 불균일성을 이용하면 과장대역폭을 증가시킬 수 있다는 생각에서 양자점 고휘도 발광소자 (Superluminescent diodes, SLD)에 대한 연구도 진행되어 왔으며 성능향상도 보고되었다 [4-8]. 그 중 대표적인 시도 중의 하나는 chirped 양자우물과 유사하게 에너지가 다른 양자점 층을 다층으로 쌓은 chirped 양자점 구조를 이용한 과장대역폭 증가라 할 수 있다 [6]. 본 연구에서는 InAs 기반 1.2~1.3 μm 과장대역에 있는 chirped 양자점 구조의 전기적 광학적 특성을 비교 분석하였다. 이와 같은 연구결과는 향후 고휘도 발광소자의 과장대역폭 증가에 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 양자점 에피구조 및 소자 제작

Fig. 1(a)는 본 연구에 사용된 양자점 에피구조의 전체 개략도를 나타낸 것이다. GaAs 기판 위에 Molecular Beam Epitaxy (MBE)로 성장되었으며, 양자점 활성층 (active layer)을 중심으로 위층과 아래층은 각각 p-와 n-도핑으로 구분되며 대칭구조를 이루고 있다. Fig. 1의 (b), (c), (d)는 Fig. 1(a)에 나타낸 양자점 활성층을 자세하게 나타낸 것이다. Fig. 1(b)는 에너지 밴드갭이 1.3 μm에 해당하는 InAs 양자점이 5층으로 구성된 것이며 (Type 1), Fig. 1(c)는 에너지 밴드갭이 1.3 μm에 해당하는 InAs 양자점 3층과 1.2 μm에 해당하는 양자점 3층으로 구성된 chirped 양자점 활성층을 나타낸 것이다 (Type 2). Fig. 1(d)는 Fig. 1(c) 구조에서 1.2 μm와 1.3 μm 양자점 층 사이에 1.25 μm InAs 양자점 층을 삽입하되, 각 과장에서의 InAs 양자점 층의 개수는 2개로 하여 총 6개 층으로 구성된 또 다른 chirped 양자점 활성층을 나타낸 것이다 (Type 3).

성장된 세 종류의 InAs 양자점 구조를 이용하여 상온 광발광 (photoluminescence, PL) 특성과 상온 전기발광 (electroluminescence, EL) 특성을 측정하였다. 상온 PL 특성 측정은 532 nm 그린 레이저를 이용하였고, EL 특성은 고휘도 발광소자를 제작하여 측정하였다. 고휘도 발광소자는 과장대역폭이 LED처럼 넓되, 광출력은 레이저 다

* [전자우편] hikoel@kist.re.kr

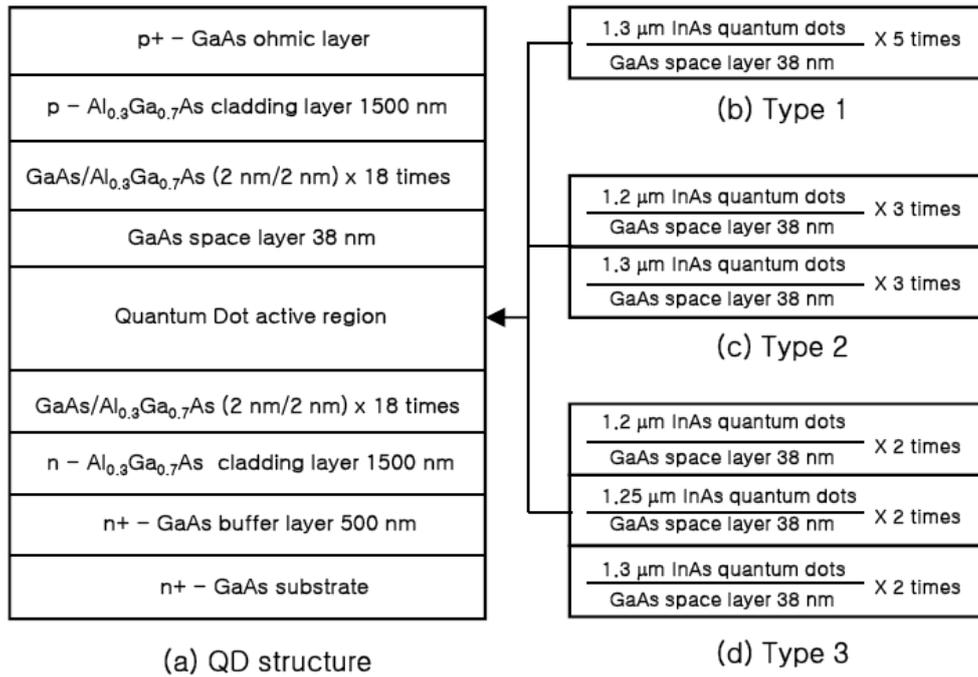


Figure 1. Various InAs quantum dot epi-structures.

이오드 (Laser Diodes, LD)처럼 높은 반도체 광원이다. 이와 같은 특성의 광원을 제작하기 위해서는 LD에서 나타나는 Fabry-Perot 공진모드를 억제하는 것이 필수이며, 이를 위해서는 광이 진행되는 도파로가 직선이 아닌 기울어진 구조를 갖는 것이 일반적이는데 본 연구에서는 J-shape 도파로를 사용하였고, 이에 대한 세부 내용은 기 발표된 문헌을 참고할 수 있다 [9,10,11].

III. 전기 광학적 특성

Fig. 2는 Fig. 1(b), (c), (d)에 나타낸 Type 1~3 양자점 구조의 상온 PL 특성을 나타낸 것이다. Type 3의 경우 주요 피이크 (main peak)가 1.3 μm 보다 조금 큰 위치에서 측정되었으나, 비교를 위하여 Type 1 및 2의 주요 피이크인 1.28 μm 주위로 이동시키었다. 한편, Fig. 1에서 설명한 바와 같이 3가지 Type의 양자점 구조는 모두 상온에서 1.3 μm 대역의 양자점을 포함하고 있는데 실제 성장에서는 의도했던 1.3 μm 와 정확히 일치하지 않게 성장되었음에 유의할 필요가 있다.

다시 Fig. 2에서 Type 1의 경우, 1.28 μm 와 1.2 μm 주위

에서 각각 피이크가 형성되었음을 알 수 있다. 1.28 μm 에서의 피이크는 Fig. 1의 (b)에서 의도했던 1.3 μm 양자점의 기저준위 (ground state)에 의한 것으로 이해할 수 있다. 1.2 μm 주위에서의 피이크는 여기준위 (excited state)에 의한 것일 수도 있고, 또는 결함 등 다른 요소에 의한 것일 수도 있는데 Fig. 2의 내부그림에 의하여 원인을 도출할 수 있다. Fig. 2의 내부그림은 펄핑용 광원의 출력을 변화시키면서 나타난 PL 특성을 기저준위의 피이크 세기로

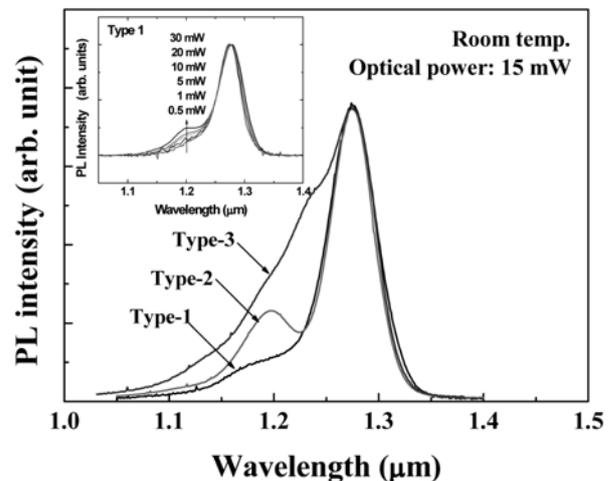


Figure 2. PL spectra of various InAs QD structures.

표준화 (normalization) 한 것이다. 광출력의 증가에 따라 1.2 μm 주위의 피이크 세기도 함께 증가하는 것을 보여주는데 이는 여기준위의 전형적인 특성이라 할 수 있으며, 따라서 1.2 μm 주위에 나타난 피이크는 1.3 μm InAs 양자점의 여기준위에 기인한 것으로 이해된다 [7,12].

Type 2의 경우 Type 1과 마찬가지로 1.28 μm 에서와 1.2 μm 에서 피이크가 형성되었는데 1.2 μm 에서의 피이크 세기가 더 크다는 것이 Type 1과 다른 점이다. 이는 Type 2가 1.3 μm InAs 양자점 뿐만 아니라 1.2 μm InAs 양자점을 포함하는 구조로 성장되었기 때문이며, 또한 공교롭게도 1.3 μm InAs 양자점의 여기준위와 1.2 μm InAs 양자점의 기저준위가 중첩되는 특성이 나타나는 것으로 이해된다. Type 3는 Type 2의 구조에서 1.25 μm InAs 양자점 층이 추가된 것으로서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1.25 μm 주위에서의 피이크도 형성되어 Type 1과 Type 2에 비하여 넓은 과장대역에서 PL 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 chirped 양자점 구조는 과장대역폭이 넓은 고휘도 발광소자를 개발하는데 중요한 요소가 될 것으로 기대된다.

제작된 고휘도 발광소자의 전기발광 특성을 측정하였고, 그 결과를 PL 특성과 비교하여 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3은 Type 1 구조에 대한 EL과 PL 특성을 비교한 것이다. PL에서 나타난 2개의 피이크 A와 B는 각각 앞에서 설명한 바와 같이 1.3 μm InAs 양자점의 기저준위와 여기준위에 기인한 것이다. EL 특성에서도 PL과 마찬가지로 두 개의 피이크가 관측되며, PL에서의 피이크와 정확히 일치하는 것을 볼 수 있다. 두 피이크 사이의 거리는 84 nm로

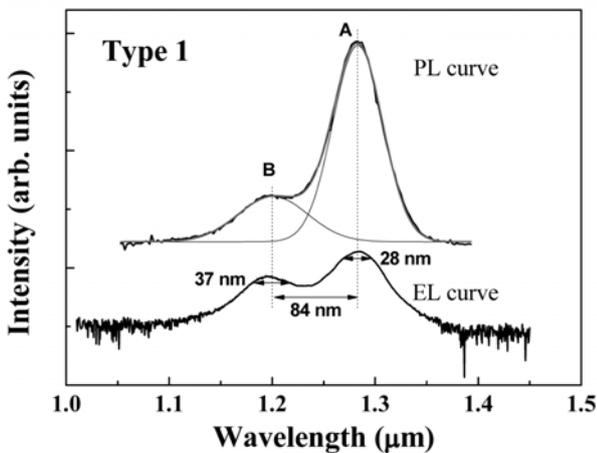


Figure 3. Comparison of EL and PL characteristics for Type 1 sample.

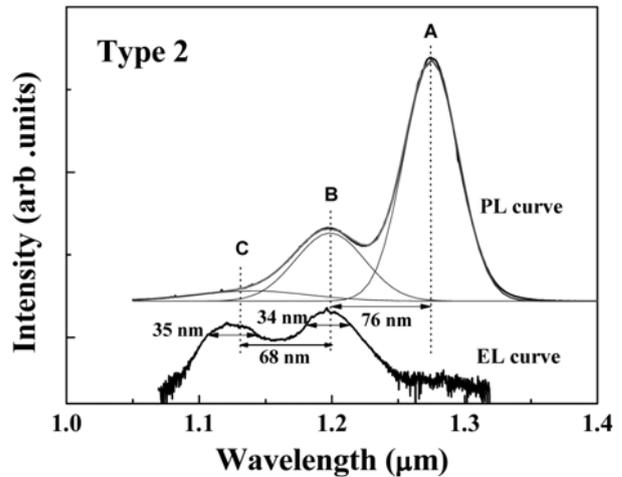


Figure 4. Comparison of EL and PL characteristics for Type 2 sample.

측정되었다. 이와 같이 PL과 EL 특성의 일치는 PL 특성 측정만으로도 EL 특성을 어느 정도 예측가능하다는 것을 의미한다. 양자우물과 달리 양자점을 이용한 고휘도 발광소자의 EL 특성에서 기저준위 및 여기준위에 의한 2개의 피이크가 나타나는 것은 일반적인 특성이며 [7,12], 이는 양자점 구조에서 기저준위에 존재할 수 있는 상태밀도 개수가 양자우물에 비하여 상대적으로 작기 때문이다 [7,12]. 한편 EL 특성에서 나타난 피이크 A 및 B의 3 dB 과장대역폭은 각각 28 nm 및 37 nm로 측정되었으며 이때 인가된 전류는 0.4 A 이었다.

Fig. 4는 Type 2 구조에 대한 EL과 PL 특성을 비교한 것이다. Fig. 2에서 설명한 바와 같이, PL 특성의 경우 피이크 A는 1.3 μm InAs 양자점의 기저준위에 기인하고, 피이크 B는 1.2 μm InAs 양자점의 기저준위와 1.3 μm InAs 양자점의 여기준위가 중첩해서 이루어진 것으로 설명된다. 광펄스 출력에 따른 PL 피이크의 변화 관측 및 표준화 결과 (not shown here) 피이크 C의 세기가 광출력의 증가에 따라 함께 증가하는 것이 관측되었으며, 따라서 피이크 C는 1.2 μm InAs 양자점의 여기준위에 기인한 것으로 판단된다. 한편 EL 피이크와 비교하였을 때, Type 1에서와는 달리 EL의 주요 피이크가 PL의 피이크 B와 C에서 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4에서 피이크 A에 대응하는 EL 피이크가 잘 나타나지는 않지만 현재의 EL 측정을 위한 주입전류보다 낮은 주입전류를 인가 할 경우, 피이크 A에 대응하는 EL 피이크가 뚜렷하게 나타났으며 이는 문헌 [9]의 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

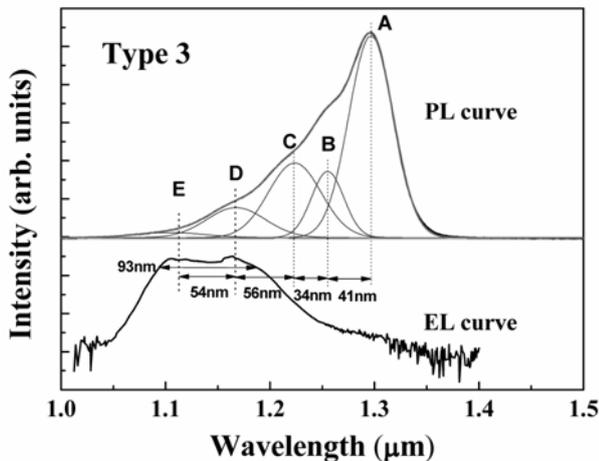


Figure 5. Comparison of EL and PL characteristics for Type 3 sample.

Type 2와 같은 chirped 양자점 구조를 통하여 의도했던 바는 EL 피크가 1.3 μm 와 1.2 μm 를 중심으로 형성되어 파장대역폭이 증가된 고휘도 발광소자의 개발 가능성을 기대한 것인데, Fig. 4에서 보여준 EL 특성에서는 PL과는 달리 1.3 μm InAs 양자점에 의한 영향이 거의 나타나지 않았다. 앞에서 설명한 바와 같이 Type 2 구조는 3층의 1.3 μm InAs 양자점 층과 3층의 1.2 μm InAs 양자점 층으로 구성되어 있다. 따라서 각 종류의 양자점에 의한 EL 기여도가 동일하다고 가정하면 EL에서 1.3 μm 보다 1.2 μm 영역에서 피크가 더 우세하게 나오는 것은 높은 전류주입으로 인하여 1.2 μm 영역에서의 피크가 1.2 μm InAs 양자점의 기저준위에 의한 영향과 1.3 μm InAs 양자점의 여기준위에 의한 영향이 중첩되어 나타났기 때문으로 이해할 수 있다. 따라서 1.3 μm InAs 양자점과 1.2 μm InAs 양자점이 EL 특성에서 동일하게 기여하기 위해서는 양자점 층의 개수가 동일한 것 보다는 1.3 μm InAs 양자점 층의 개수가 상대적으로 더 많아서 그 파장대역에서의 기저준위 개수를 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 한편 Type 1에서와 마찬가지로 Type 2의 EL 특성에서 나타난 피크 B 및 피크 C에서의 3 dB 파장대역폭은 각각 34 nm 및 35 nm로 측정되었으며, 이때 인가된 전류는 0.8 A 이었다.

Fig. 5는 Type 3 구조에 대한 EL과 PL 특성을 비교한 것이다. PL 곡선의 경우, 1.3 μm , 1.25 μm , 1.2 μm InAs 양자점 층이 각 2층으로 구성되어 이들의 기저준위와 여기준위에 의하여 넓은 파장범위에서 PL 특성이 나타나고 있다. Type 1 및 2에서와 마찬가지로 광펌핑 출력에 의한 PL 피

이크의 변화와 그 결과를 표준화 하였을 때, A, B, C 피크의 상대적 세기 변화는 일정한 반면, 피크 D 및 E의 세기는 광펌핑 출력의 증가에 따라 함께 증가하였다 (not shown here). 따라서 피크 A, B, C는 각각 1.3 μm , 1.25 μm , 1.2 μm InAs 양자점의 기저준위에 기인한 것이며, 피크 D와 E는 이들의 여기준위에 기인한 것으로 판단된다. 각 피크 사이의 간격을 고려할 때, 피크 C는 Fig. 4에서의 피크 B와 마찬가지로 1.3 μm InAs 양자점의 여기준위와 1.2 μm InAs 양자점의 기저준위에 의하여 형성된 것으로 판단된다. 따라서 피크 D와 피크 E는 각각 1.25 μm InAs 양자점과 1.2 μm InAs 양자점의 여기준위에 의하여 형성된 것으로 이해된다.

한편 Fig. 5의 EL 특성에 의하면 PL에서의 피크 D와 E에 해당하는 파장을 중심으로 3 dB 파장대역폭이 약 93 nm로서 Type 1 및 2에 비하여 넓게 파장대역폭이 형성되었음을 알 수 있다. 물론 피크 A, B, C에 의한 영향이 EL 특성에 반영되어야 함이 당연할 것이다. Fig. 5에 보여준 EL 특성은 주입전류가 0.8A 정도로 높은 상태에서 얻어진 결과이며, 주입전류가 0.2A 정도로 낮은 상태에서는 피크 A, B, C에 해당하는 EL 피크가 나타남을 기준에 발표한 논문을 통하여 확인할 수 있다 [6].

IV. 요약 및 논의

앞에서 여러 가지 종류의 InAs 양자점 구조를 이용하여 PL 및 EL 특성을 측정하고 결과를 비교하였고, 각각의 양자점 구조에서 얻어진 PL 및 EL 피크의 원인을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 쉽게 알 수 있는 것은 PL의 경우 양자점 구조의 Type에 상관없이 대부분 기저준위에 의한 피크가 우세하게 나타나는 반면, EL의 경우 특히 chirped 양자점 구조의 경우 기저준위에 의한 특성보다는 여기준위에 의한 특성이 더 우세하게 나타난다는 것이다. 이는 PL 특성이 정확히 EL 특성으로 나타나지 않을 수 있음을 설명하는 좋은 예가 되며, 이에 대한 명확한 물리적 해석을 위한 추가 연구가 진행되고 있다. 한편 EL에서 높은 전류 주입에 의해 기저준위에 의한 특성보다 여기준위에 의한 특성이 더 우세하게 나타나는 것은 양자점 구조에서는 기저준위에 존재할 수 있는 에너지상태밀도의 개수가 양자우물에 비하여 상대적으로 적기 때문에 적은 주입전류

Table 1. Type 1, 2, 3 InAs 양자점의 PL 피이크와 EL 피이크 비교.

Samples	Measurements	Peak A	Peak B	Peak C	Peak D	Peak E	Remarks
Type 1	PL	1.3 μm QD GS	1.3 μm QD ES	-	-	-	Fig. 3
	EL	1.3 μm QD GS	1.3 μm QD ES	-	-	-	Fig. 3
Type 2	PL	1.3 μm QD GS	1.3 μm QD ES + 1.2 μm QD GS	1.2 μm QD ES	-	-	Fig. 4
	EL	weak	1.3 μm QD ES + 1.2 μm QD GS	1.2 μm QD ES	-	-	Fig. 4
Type 3	PL	1.3 μm QD GS	1.25 μm QD GS	1.3 μm QD ES + 1.2 μm QD GS	1.25 μm QD ES	1.2 μm QD ES	Fig. 5
	EL	weak	weak	weak	1.25 μm QD ES	1.2 μm QD ES	Fig. 5

에도 기저준위가 쉽게 채워지고 주입된 전류의 나머지가 에너지상태밀도의 개수가 더 많은 여기준위를 채우기 때문이다 [7,12].

앞에서도 언급한 바 있지만, chirped 양자점 구조를 사용하고자 한 이유는 고휘도 발광소자에서 과장대역폭을 증가시키기 위함이었다. 사실 Fig. 3~Fig. 5에 나타난 EL 피이크를 보면 Type 1에서 2, 3으로 갈수록 EL 피이크 사이의 골이 작아지면서 3dB 대역폭이 증가하여 chirped 구조를 사용한 목적이 어느 정도 달성되고 있음을 알 수 있다. 문제는 과장대역폭이 의도했던 기저준위의 결합에서 형성되지 않고 여기준위의 결합으로 형성되어 중심파장이 청색편이 하였다는 것이다. 이와 같은 결과가 양자점 층의 개수가 동일한 chirped 양자점 구조에서 얻어졌다는 사실로 미루어 볼 때 chirped 양자점 구조를 설계할 때 과장이 긴 양자점 층은 작은 양자점 층에 비하여 개수를 더 많게 해야 함을 시사하고 있고, 그 경우 기저준위도 과장대역폭 증가에 참여할 수 있으므로 과장대역폭이 더욱 증가된 고휘도 발광소자가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

에너지 밴드갭에 해당하는 과장이 1.3 μm 인 InAs 양자점 층 5개로 구성된 양자점 구조 (Type 1), 1.3 μm InAs 양자점 층 3개와 1.2 μm InAs 양자점 층 3개로 구성된 chirped 양자점 구조 (Type 2), 그리고 각 2개의 1.3 μm , 1.25 μm , 1.2 μm InAs 양자점 층으로 구성된 chirped 양자점 구조 (Type 3)에 대하여 PL 및 EL 측정을 하고 결과를 비교하였다. PL의 경우, 모든 Type의 양자점 구조에서 기저준위에 의한 피이크가 우세하게 나타난 반면, EL의 경우 기저준위보다는 여기준위에 의한 피이크가 우세하게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 chirped 양자점 구조를 설계할 때 에너지 밴드갭에 해당하는 과장이 긴 양자점 층의 개수를 짧은 양자점 층의 개수보다 더 많게 할 경우, 긴 과장을 가진 양자점의 기저준위도 EL 특성으로 반영될 것이며, 따라서 과장대역폭이 더욱 넓어지는 고휘도 발광소자를 개발하는데 이용될 수 있음을 알았다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 지식경제부 IT 산업원천기술개발 사업 (2M23780)의 재원에 의하여 이루어진 연구 결과이며 이에 감사드립니다. 또한 Fig. 2의 inset에 나타난 광출력 의존 PL 특성을 측정하여 주신 충남대학교의 김문덕 교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] N. Hatori, K. Otsubo, M. Ishida, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, S. Okumura, T. Yamamoto, M. Sugawara, and Y. Arakawa, Post-deadline Paper of ECOC'04 (2004).
- [2] M. Sugawara, N. Hatori, M. Ishida, H. Ebe, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, T. Yamamoto, and Y. Nakata, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 2126 (2005).
- [3] P.G. Eliseev, H. Li, A. Stintz, G.T. Liu, T.C. Newell, K.J. Malloy, and L.F. Lester, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 262 (2000).
- [4] D.C. Heo, J.D. Song, W.J. Choi, J.I. Lee, J.C. Jung, and I.K. Han, *Electron. Lett.* **39**, 863 (2003).
- [5] Z.Y. Zhang, Z.G. Wang, X.P. Jin, Z.Z. Sun, and F.Q. Liu, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **16**, 27 (2004).
- [6] Y.C. Yoo, I.K. Han, and J.I. Lee, *Electron. Lett.* **43**, 1045 (2007).
- [7] L. H. Li, M. Rossetti, A. Fiore, L. Occhi, and C. Velez, *Electron Lett.* **41**, 41 (2005).
- [8] Y.C. Xin, A. Martinez, T. Saiz, A.J. Moscho, Y. Li, T.A. Nilsen, A.L. Gray, and L. F. Lester, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 501 (2007).
- [9] I.K. Han, H.C. Bae, W.J. Cho, J.I. Lee, H.L. Park, T.G. Kim, and J.I. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 5692 (2006).
- [10] 유영채, 이정일, 김경찬, 김은규, 김길호, 한일기, *한국진공학회지* **15**, 493 (2006).
- [11] 유영채, 한일기, 이정일, *한국진공학회지* **16**, 353 (2007).
- [12] M. Rossetti, L. Li, A. Fiore, L. Occhi, C. Velez, S. Mikhlin, and A. Kovsh, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**, 1946 (2006).

Optical and Electrical Characteristics of Chirped Quantum Dot Structures for the Superluminescent Diodes with Wide Spectrum Bandwidth

Il Ki Han*

Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

(Received July 31, 2009, Revised September 1, 2009, Accepted September 2, 2009)

We analyzed photoluminescence (PL) and electroluminescence characteristics of various chirped quantum dot structures. Peaks in EL curves were contributed by excited states of quantum dots (QD), while those in PL curves by grounded states. Based on these characteristics, we suggested that superluminescent diodes with wide spectral bandwidth may be developed if chirped QD structures are designed to make a contribution by ground states to EL characteristics.

Keywords : Superluminescent diodes, Chirped quantum dots, Photoluminescence, Electroluminescence

* [E-mail] hikoel@kist.re.kr