

# In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN 다중 양자우물 구조에 대한 광전기적 특성

박헌보 · 배인호<sup>†</sup> · 김기홍\*

영남대학교 물리학과, \*경운대학교 안경광학과

## Optoelectronics Properties of In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN Multi-Quantum-Well Structure

Hun-Bo Park, In-Ho Bae<sup>†</sup> and Ki-Hong Kim\*

Department of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749.

\*Department of Visual Optics, Kyungwoon University, Kumi 730-852

(2007년 7월 30일 받음, 2007년 9월 5일 최종수정본받음)

**Abstract** Temperature and injection current dependence of electroluminescence(EL) spectral intensity of the In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN multi-quantum-well(MQW) have been studied over a wide temperature and as a function of injection current level. EL peaks also show significant broadening into higher photon energy region with the increase of injection current. This is explained by the band-filling effect. When temperature is slightly increased to 300 from 15 K, the EL emission peak showed red-blue-red shift. It can be explained by the carrier localization by potential fluctuation of multiple quantum well and band-gap shrinkage as temperature increase. It is found that a temperature-dependent variation pattern of the EL efficiency under very low and high injection currents show a drastic difference. This unique EL efficiency variation pattern with temperature and current is explained field effects due to the driving forward bias in presence of internal(piezo and spontaneous polarization) fields.

**Key words** InGaN/GaN, Multiple quantum well, Electroluminescence, Band-filling.

### 1. 서 론

GaN계의 화합물을 이용한 발광 다이오드(light emitting diode : LED) 연구는 1970년대 부터 시작되었다. 고휘도 청색 발광 다이오드(bright blue LED)가 일본 Nichia chemical사 Nakamura 그룹에 의해 1991년에 발표되었고, 1995년에 상온에서 연속 발진하는 반도체 레이저의 개발이 보고된 이후 세계적으로 활발하게 연구되고 있는 반도체이다.<sup>1-4)</sup>

일반적으로 청색의 단파장 광원을 얻기 위하여 사용된 재료는 IV-IV족 SiC계, II-VI족 ZnSe계의 화합물이 있고, GaN계에 비해 적은 10<sup>4</sup>/cm<sup>2</sup>의 결함밀도에도 불구하고 재료의 휘도와 수명이 짧다는 결점을 지니고 있다. SiC 화합물의 경우 p-형, n-형 불순물의 첨가와 전도성 제어가 용이하여 80년대 후반에 밀리 칸델라(mcd)급 저휘도 청색 LED로 개발되었으나, 간접 전이형 에너지 밴드구조이기 때문에 고휘도 발광 소자로서 적절하지 못하였다. 그리고 직접 전이형 에너지 밴드구조를 갖는 ZnSe

계는 기판으로 사용되었던 GaAs와의 격자 부정합도가 작아 결정 성장시에 좋은 특성을 나타내는 반면에, 주로 molecular beam epitaxy(MBE)법을 사용하므로, 원소 증기압이 높은 Zn, Se, Mg, S 등의 원소 첨가 및 제어와 p형 물질의 불순물 첨가가 어렵다는 단점이 있다.<sup>5-7)</sup>

그러나 GaN 박막은 광소자로서의 응용이 적절한 직접 전이형 에너지 밴드구조를 가지고 있고, 기판과의 부정합 정도가 발광 특성에 큰 영향을 주지 않는다. 특히 GaN는 InN나 AlN와의 연속적인 고용체를 형성하여 조성에 따른 삼원계 질화물을 제조 즉, 불순물의 활성화 에너지 및 도핑 농도에 따라 파장 변화를 가능하게 함으로 적외선 발광 다이오드뿐 아니라, 파장의 선택 범위가 넓은 가시 발광 다이오드의 제작을 실현하였다.<sup>8-10)</sup>

본 연구에서는 MOCVD법 성장 장치를 이용하여 제작한 In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN 다중 양자우물(multiple quantum well; MQW) 구조의 시료에 대한 주입 전류 변화에 따른 EL 스펙트럼의 온도 의존성 및 온도 변화에 따른 전류-전압의 측정으로 띠 구조를 연구함과 동시에 그 특성을 이해함으로써, 이상적인 구조 설계의 최적화와 응용성을 기르고자 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : ihbae@yu.ac.kr (In-Ho Bae)

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시료는 직경 2인치의 사파이어 기판(c-plane)위에, metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)를 이용하여 도핑하지 않은 GaN을 560°C 에서 50 nm 성장하고, 그 위에 Si 이 도핑된 n<sup>+</sup>-GaN( $N_D = 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ )을 1.5  $\mu\text{m}$  두께로 성장하였으며, 그 위에 n-GaN( $N_D = 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ )을 1.2  $\mu\text{m}$  두께로 성장하였다. 활성층으로 In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN(3 nm/20 nm) 양자 우물층을 5주기로 쌓고, 그 위에 EBL(electron blocking layer) 역할을 하는 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N층(0.05  $\mu\text{m}$ ), Mg 도핑된 p-GaN( $N_A: 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ , 70 nm) 순서로 성장한 뒤, 마지막으로 p<sup>+</sup>-GaN( $N_A: 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ )을 성장하였다.

Mesa로 만들기 위해서 inductive coupled plasma(ICP) 장비를 이용하여 n-GaN층이 충분히 드러나게 식각 후 잔류한 SiO<sub>2</sub> 막은 buffered oxide etchant(BOE)용액으로 제거하였다. 전극을 형성하기 위해 전자빔 증착기를 이용하여 n-GaN위에 In을 p-GaN 위쪽에는 Ni/Au(50 nm/50 nm)를 증착하여 제작하였다.

EL 측정은 He refrigerator(CTI-22)를 이용하여 저온장치 내의 온도를 15 K으로 내린 후 수행했다. 측정온도는 온도 조절장치(Lakeshore-330)를 이용하였다. 또 시료에 직류 전원을 공급하기 위해서 Keithley사의 2400 source meter 모델을 사용하였다. 시료에서 발광하는 빛을 렌즈로 집속한 다음, 광단속기(chopper)를 이용하여 광을 단속한 다음 1차 렌즈에서 집속된 빛을 2차 렌즈를 써서 한번 더 집속시킨 후 초점거리가 0.5 m인 분광기(DM 501)에 집속된 광을 입사시켰다. 그리고 광전자 증배관을 이용하여 신호를 검출하여 이를 증폭기(preamp)를 통하여 증폭시킨 다음, lock-in 증폭기를 거쳐 컴퓨터에 규격화된 신호를 기록하였다.

## 3. 결과 및 고찰

MOCVD로 성장한 In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN 다중 양자우물 구조를 15 K, 주입전류 10 mA 조건에서 측정한 EL 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다.

측정된 EL 신호는 그림에서 보는 바와 같이 각각 In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN 양자우물 전이신호(P<sub>1</sub>)와 GaN에 도핑된 Mg 과 관련된 전이신호(P<sub>2</sub>)라 할 수 있다.<sup>11-14)</sup> 그리고 실온에서는 양자우물 피크 P<sub>1</sub>만 관측 되었고, 온도를 감소시키면 피크 P<sub>2</sub>는 140 K에서 나타나기 시작하여 온도를 감소시킬 수록 피크의 세기는 증가하였다. 이 두 피크의 온도 변화에 따른 integrated intensity 크기를 Fig. 1에 삽입하여 나타내었다. 이는 Lee 등<sup>15)</sup>이 연구한 결과와 일치하였다.

Fig. 2는 주입 전류를 0.1~100 mA까지 변화시키면서

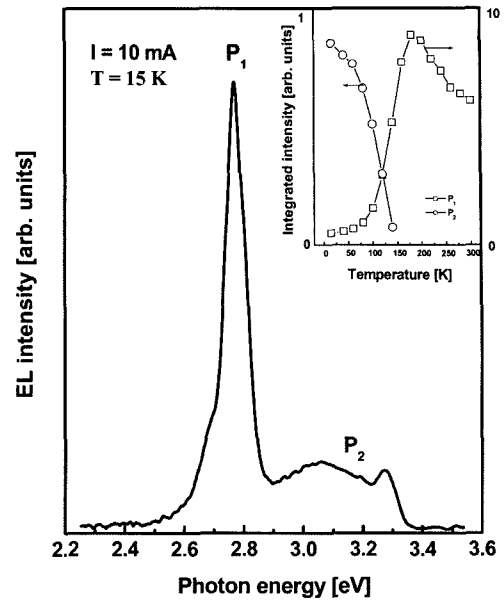


Fig. 1. The EL spectrum for InGaN/GaN MQW at 15 K. The inset shows a integrated EL intensity of quantum well(P<sub>1</sub>) and Mg-related(P<sub>2</sub>) emission peaks at various temperatures.

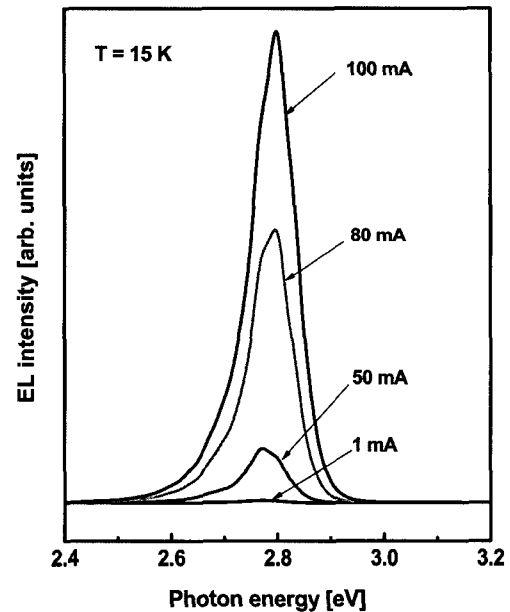


Fig. 2. The EL spectra for InGaN/GaN MQW with increasing the injection current from 0.1 mA to 100 mA.

얻은 EL 스펙트럼이다. 주입 전류의 증가에 따라 EL 신호 전체가 증가하면서 신호의 피크위치가 큰 광자 에너지 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 주입 전류에 의해 생성된 캐리어는 양자우물 속의 quantum subband를 채우게 되는데, 전류의 세기가 증가하면 단위시간당 생성되는 캐리어의 수가 증가되므로 subband가 급격히 채워지는 band-filling 효과가 일어나게 된다. 따라서 전도

대와 가전자대의 subband top에 있는 캐리어들 사이에서 재결합이 일어나게 되므로 EL 신호가 고에너지 쪽에서 발생하게 되며, 주입전류의 세기가 증가할수록 subband의 높은 에너지 위치까지 채워지게 되므로 고에너지 쪽으로 EL 신호가 발생하는 것이다.<sup>16)</sup> 이러한 subband는 깊은 준위의 결함이나 불순물 또는 InGaN 양자우물의 두께와 In 조성으로 인한 퍼텐셜 요동(potential fluctuation) 등에 의한 원인들을 고려하여야 한다.<sup>17-19)</sup>

Fig. 3에서는 온도에 따른 전류-전압 특성을 측정하여 나타내었다. 10 mA 순방향 전류일 때 순방향 전압은

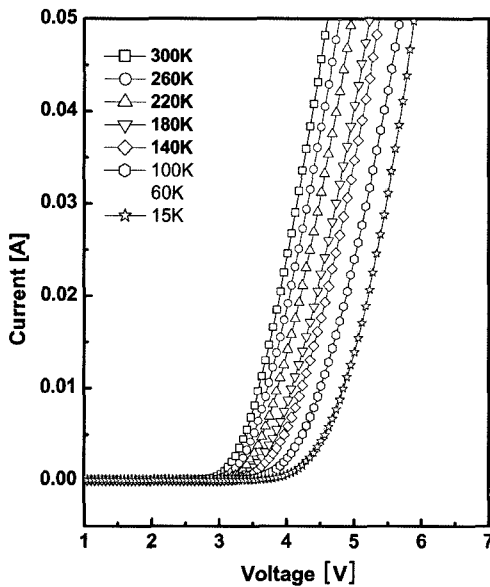


Fig. 3. Current-voltage characteristics of InGaN/GaN MQW as a function of temperature between 15 and 300 K.

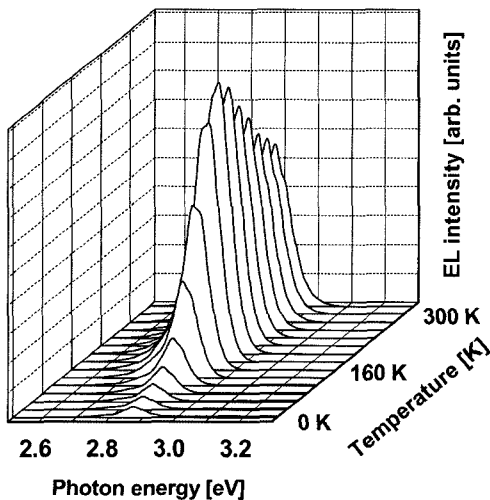


Fig. 4. Three-dimensional plots of EL spectra of InGaN/GaN MQW as a function of photon energy and temperature at injection current of 10 mA.

300 K에서 약 3.6 V, 15 K에서 약 4.9 V가 됨을 보여주고 있다. 온도가 300 K에서 15 K로 감소하면 순방향 전압은 약 1.3 V 정도 증가한다. 이는 온도가 감소함에 따라 다이오드에서 전류수송의 변화에 기인한 것이다.<sup>20)</sup>

Fig. 4에서는 주입전류가 10 mA인 경우의 온도 및 전류에 따라서 발광세기와 발광 파장이 어떻게 변하는지를 3차원 그래프로 나타내었다. 온도의 상승에 따라 15 K에서 140 K 영역에서는 온도가 증가함에 따라 피크의 위치가 낮은 에너지로 이동하게 되고, 그 후에는 160 K에서 240 K영역에서는 피크 위치가 높은 에너지 쪽으로 이동한다. 그리고 240 K에서 300 K영역에서는 낮은 에너지 쪽으로 이동하게 됨을 보여준다. 처음에 낮은 에너지로 이동하는 것은 온도가 증가함에 따라 열 효과에 의한 띠 간격 줄어들음으로 인하여 낮은 에너지로 이동하게 되고, 점차 온도가 더 증가하게 되면 띠 채움 효과가 열 효과보다 더 커지게 되어 높은 에너지로 이동하게 된다. 그 후 더욱 온도가 증가하게 되면 열 효과가 더 크게 작용하여 다시 낮은 에너지로 이동하게 되는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 경향은 In 조성에 의한 온도 증가에 따라 열 효과에 의한 띠 간격 축소와 다중 양자우물 구조에 의해 심화된 퍼텐셜 요동에 의한 운반자들의 구속(carrier localization) 현상으로 설명할 수 있다.<sup>21)</sup>

그리고 보통 GaAs SQW의 경우에는 온도가 낮을수록 밴드갭의 변화에 따라 단조롭게 발광세기가 커지는 반면에, InGaN/GaN MQW의 경우는 어떤 특정한 온도에서 가장 큰 발광세기를 보인 후에 온도가 떨어질수록

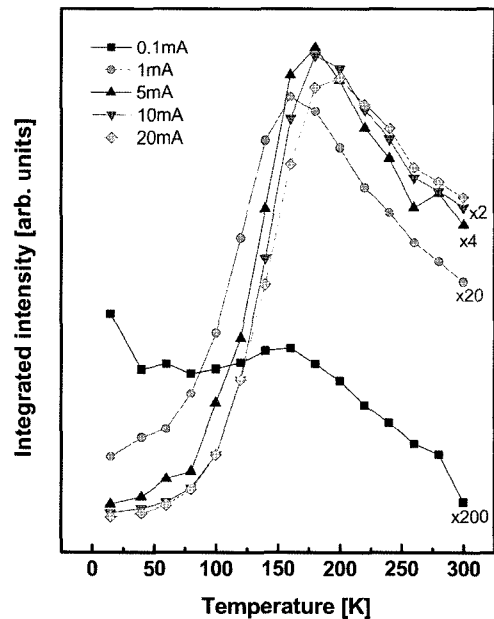


Fig. 5. Temperature dependence of the integrated EL intensity for InGaN/GaN MQW at five injection currents of 0.1, 1, 5, 10 and 20 mA.

낮은 발광세기를 보이는 현상<sup>22)</sup>을 주입전류 0.1, 1, 5, 10, 및 20 mA 의 변화에 따른 EL 효율을 온도의 함수로 Fig. 5 나타내었다.

그림에서 온도와 전류에 따른 발광효율을 알 수 있는데, 저전류를 주입할 경우와 고전류를 주입할 경우 온도에 의존하는 EL 효율이 다르다는 것을 보여준다. 주입 전류가 클 경우 즉, 순방향 구동 전압이 클 때는 180 K 이하의 온도에서 EL 세기가 감소되어짐을 알 수 있다. 이렇게 온도와 전류에 따라 특이한 EL 효율의 차이는 양자 우물에서의 자발 분극장(spontaneous polarization field)과 강한 압전장(piezoelectric field)의 존재 하에서 구동되는 순방향 바이어스에 의한 외부 장의 효과로 설명될 수 있다.<sup>23)</sup> EL 효율의 특이한 온도 의존성은 캐리어 포획과 내부 양자 효율의 상호작용에 의해서 유발되어 진다. 일반적으로 200~300 K에서는 주입 전류가 크면 EL 효율이 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 주입 전류가 클수록 비복사성 재결합 센터들이 충전되기 때문이다. 저온에서는 상온에서 주입시켜준 동일한 주입 전류에 대해서 상온 보다 높은 전압을 걸어줘야 하기 때문이다. 더 큰 전류를 주입 시키기 위해서는 높은 전압을 인가해야만하고, 이로 인하여 밴드가 양자 우물 내에 구속되는 캐리어가 터널링 될 수 있는 가능성도 커진다. 그리하여 양자우물에서의 캐리어 누설이 발생하게 되고 EL 효율이 떨어지게 되는 것이다.

#### 4. 결 론

MOCVD법으로 성장된  $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}/\text{GaN}$  다중 양자우물 구조의 온도와 주입전류 변화에 따른 특성을 EL 스펙트럼 측정을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

주입전류가 증가하면 EL 피크가 고에너지 쪽으로 이동함은 band-filling 효과에 기인한 것으로 설명할 수 있다. 그리고 온도의 증가에 따라 발광피크가 red-blue-red 이동을 하는데, 이는 온도 증가에 따라 다중 양자우물구조에 의해 심화된 퍼텐셜 요동에 의한 운반자 구속과 띠간격 축소에 의한 영향을 보여주는 것이다. 그리고 저전류와 고전류 주입시 EL 효율의 온도 의존 변화는 매우 다르게 나타나는데, 이러한 온도와 전류의 변화에 의한 독특한 EL 효율의 변화는 내부 전기장의 존재 하에 순방향 바이어스에 기인한 외부 전기장의 영향인 것을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, L1332 (1995).

2. Z. Z. Chen, P. Liu, S. L. Qi, K. Xu, Z. X. Qin, Y. Z. Tong, T. J. Yu, X. D. Hu and G. Y. Zhang, *J. Crystal Growth*, **298**, 731 (2007).
3. J. H. Chen, Z. C. Feng, H. L. Tsai, J. R. Yang, P. Li, C. Wetzel, T. Detchprohm and J. Nelson, *Thin Solid Films*, **498**, 123 (2006).
4. S. Suihkonen, T. Lang, O. Svensk, J. Sormunen, P. T. Törmä, M. Sopanen, H. Lipsanen, M. A. Odnoblyudov and V. E. Bougrov, *J. Crystal Growth*, **300**, 324 (2007).
5. D. C. Look, H. Lu, W. j. Schaff, J. Jasinski and Z. L. Weber, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 258 (2002).
6. H. Lu, W. J. schaff, J. Hwang, H. Wu, G. Koley and L.F. Eastman, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1489 (2001).
7. T. Inushima, V. V. Mamutin, V. A. Vekshin, S. V. Ivanov, T. Sakon, M. Motokawa and S. Ohoya, *J. Cryst. Growth*, **481**, 227 (2001).
8. A. M. Yong, C. B. Soh, X.H. Zhang, S. Y. Chow and S. J. Chua, *Thin Solid Films*, **515**, 4496 (2007).
9. L. W. Ji, T. H. Fang and T. H. Meen, *Phys. Lett.*, **A355**, 118 (2006).
10. G. Y. Zhang, Z. J. Yang, Y. Z. Tong, Z. X. Qin, X. D. Hu, Z. Z. Chen, X. M. Ding, M. Lu, Z. H. Li and T. J. Yu, *Optical Materials*, **23**, 183 (2003)
11. M. Pavesi, M. Manfredi, G. Salviati, N. Armani, F. Rossi, G. Meneghesso, S. Levada, E. Zanoni, S. Du and I. Eliashevich, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3403 (2004).
12. M. A. Reshchikov, G. C. Yi and B. W. Wessels, *Phys. Rev.*, **B 59**, 13116 (1999).
13. U. Kaufmann, M. Kunzer, M. Maier, H. Obloh, A. Ramakrishnan, B. Santic, and P. Schlotter, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1326 (1998).
14. J. I. Pankove, J. E. Berkeyheiser, H. P. Maruska and J. Wittke, *Solid State Commun.*, **8**, 1051 (1970 ).
15. C. M. Lee, C. C. Chuo, J. F. Dai, X. F. Zheng and J. I. Chy, *J. Appl. Phys.*, **89**, 6554 (2001).
16. T. Mukai, K. Takekawa and S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.(Part 2)*, **37**, L839 (1998).
17. S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4188 (1996).
18. Y. Narakawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, *Phys. Rev.*, **B55**, R1938 (1997).
19. Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 981 (1997).
20. A. Hori, D. Yasunaga, A. Satake and K. Fujiwara, *J. Appl. Phys.*, **93**, 3152 (2003).
21. Y. H. Cho, G. H. Gainer, A. J. Fischer and J. J. Song, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 569 (1997).
22. P. Bakmiwewa, A. Hori, A. Satake and K. Fujiwara, *Physica*, **E21**, 636 (2004).
23. J. S. Im, H. Kollmer, J. Off, A. Sohmer, F. Scholz and A. Hangleiter, *Phys. Rev.*, **B57**, R9435 (1998).