

In_xGa_{1-x}N/GaN 다중양자우물 구조의 광학적 성질 연구

김기홍 · 김인수* · 박현보^a · 배인호^a · 유재인^a · 장윤석^b

경운대학교 안경광학과, 구미 730-852

^a영남대학교 물리학과, 경산 712-749

^b대구과학대학 안경광학과, 대구 702-723

(2008년 10월 28일 받음, 2008년 12월 3일 수정, 2009년 1월 13일 확정)

In_xGa_{1-x}N/GaN 다중양자우물 구조의 EL 특성을 온도와 주입전류 변화에 따른 특성을 조사하였다. 저전류와 고전류 주입시 EL 효율의 온도 의존 변화는 매우 다르게 나타나는데, 이러한 온도와 전류의 변화에 의한 독특한 EL 효율의 변화는 내부전기장의 존재 하에 순방향 바이어스에 기인한 외부전기장의 영향인 것으로 볼 수 있다. 그리고 In_xGa_{1-x}N/GaN 다중양자우물 구조에서 In 조성비의 증가는 발광파장위의 적색이동을 보였다. 15K에서 주입 전류의 증가에 따라 녹색 양자우물 구조는 80 meV와 청색 양자우물 구조는 22 meV의 청색 편이를 하였다. 이는 전류의 증가에 의해 단위 시간당 생성되는 캐리어 수가 증가하게 되고 그에 따라 subband가 급격히 채워지는 band filling 현상이 일어나게 되어 짧은 파장에서 재결합이 증가하기 때문이다. 그리고 청색과 녹색 다중 양자우물구조의 짧은 파장 쪽으로의 편이 차이는 In 농도에 기인한 것으로 In 농도가 높으면 양자우물 깊이가 증가 되어 더 강한 양자속박효과가 작용하여 캐리어 구속력이 증가하기 때문 것으로 볼 수 있다.

주제어 : In_xGa_{1-x}N/GaN, 다중양자우물, 전기발광

I. 서 론

GaN계의 화합물 재료는 큰 에너지 밴드 갭과 뛰어난 화학적 안정성으로 인해 응용분야가 많은 주요한 소재이다. 특히 직접 전이형 반도체로서 빠른 응답속도, 큰 전자이동도 및 열적, 화학적 안정성을 가지며 높은 온도에서 동작이 가능하기 때문에 세계적으로 활발하게 연구되고 있는 반도체이다 [1-6].

일반적으로 청색의 단파장 광원을 얻기 위하여 사용된 재료는 IV-IV족 SiC계, II-VI족 ZnSe계의 화합물이 있고, GaN계에 비해 적은 10⁴/cm²의 결함밀도에도 불구하고 재료의 휘도와 수명이 짧다는 결점을 지니고 있다. SiC 화합물의 경우 p-형, n-형 불순물의 첨가와 전도성 제어가 용이하여 80년대 후반에 밀리칸델라(mcd)급 저휘도 청색 LED로 개발되었으나, 간접 전이형 에너지 밴드구조이기 때문에 고휘도 발광 소자로서 적절하지 못하였다. 그리고 직접 전이형 에너지 밴드구조를 갖는 ZnSe계는 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 [7-9].

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 자외선 발광 다이오드뿐 아니라, 파장의 선택 범위가 넓은 가시 발광 다이오드의 제작을 실현하였다 [10-12].

본 연구에서는 MOCVD법 성장 장치를 이용하여 제작한 조성비가 다른 In_xGa_{1-x}N/GaN 다중 양자우물(multiple quantum well; MQW) 구조의 시료에 대한 온도와 주입 전류 변화에 따른 띠구조 변화를 연구함과 동시에 그 특성을 이해함으로써, 이상적인 구조 설계의 최적화와 응용성을 기르고자 한다.

II. 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 직경 2인치의 사파이어 기판

* [전자우편] iskim@ikw.ac.kr

(c-plane)위에, metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)를 이용하여 도핑하지 않은 GaN을 560 °C에서 50 nm 성장하고, 그 위에 Si 이 도핑된 n⁺-GaN($N_D=1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$)을 1.5 μm 두께로 성장하였으며, 그 위에 n-GaN($N_D=5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)을 1.2 μm 두께로 성장하였다. 활성층으로 In_xGa_{1-x}N/GaN(3 nm/ 20 nm) 양자 우물층을 5주기로 쌓고, 그 위에 EBL(electron blocking layer) 역할을 하는 Al_{0.2}Ga_{0.8}N층(0.05 μm), Mg 도핑된 p-GaN($N_A:1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, 70 nm) 순서로 성장한 뒤, 마지막으로 p⁺-GaN($N^+:1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$)을 성장하였다. 시료는 청색과 녹색 다중 양자우물 구조의 조성비로 하였다.

Mesa로 만들기 위해서 inductive coupled plasma (ICP)장비를 이용하여 n-GaN층이 충분히 드러나게 식각 후 잔류한 SiO₂ 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 저온 장치 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 집속

된 광을 입사시켰다. 그리고 광전자 증배관을 이용하여 신호를 검출하여 이를 증폭기(pre-amplifier)를 통하여 증폭시킨 다음, lock-in 증폭기를 거쳐 컴퓨터에 규격화된 신호를 기록하였다.

III. 실험결과 및 고찰

MOCVD로 성장한 In_xGa_{1-x}N/GaN 다중 양자우물 구조의 온도 및 전류 변화에 대하여 광학적 성질을 조사하였다. Fig. 1은 청색 다중양자우물과 녹색다중양자우물구조에 주입전류 1 mA를 인가하고, 온도를 변화 시키면서 측정된 EL 스펙트럼을 나타내었다.

1 mA를 주입하였을 경우 상온에서 발광파장은 각각 445(blue MQW)와 520 nm(green MQW)였다. 그리고 주된 발광파장외의 주름은 Fabry-Perot fringe로 표면과 GaN/sapphire 계면에서의 다양한 반사들에 의해 나타났다.

Fig. 2의 (a)와 (b)는 동일하게 주입된 캐리어에 대한 발광효율을 살펴보기 위해서 주입전류에 따른 EL의 세기를 나타내었다. 이렇게 저 전류를 주입할 경우와 고 전류를 주입할 경우에 온도에 의존하여 EL 효율이 상이하다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3 (a)와 (b)에서와 같이 InGaN 양자우물구조에서 서로 다른 In 함량과 조성의 불균일성 (compositional inhomogeneity) [13-18]으로 인한 퍼텐셜 깊이의 차이로 서로 다른 EL 온도 의존성을 보여준다.

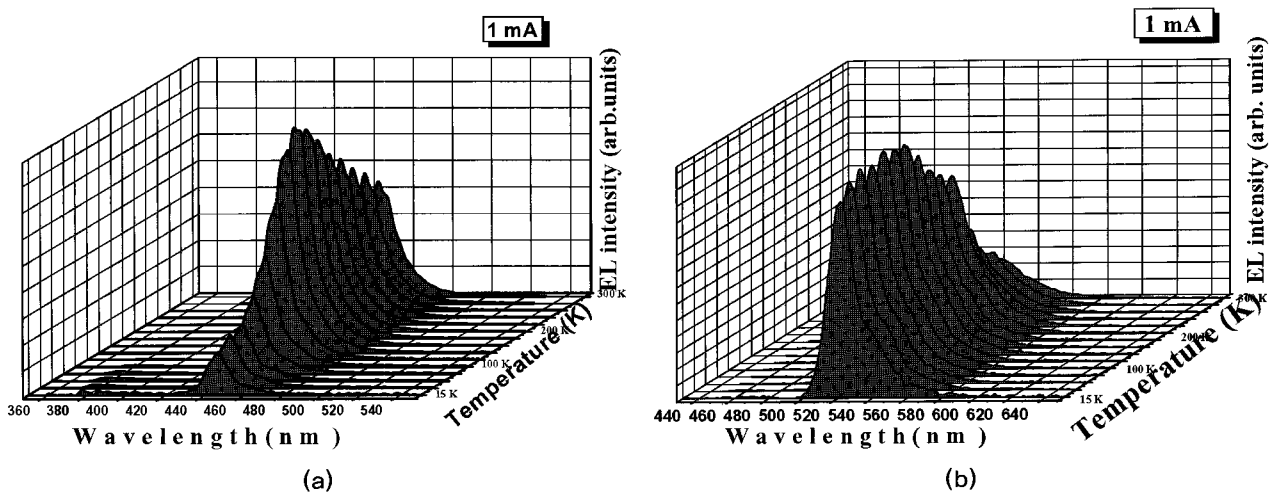


Figure 1. Temperature dependence of electroluminescence spectral intensity at an injection current of 1mA: (a) the blue MQW structure between 15 and 300 K and (b) the green MQW structure between 15 and 300 K.

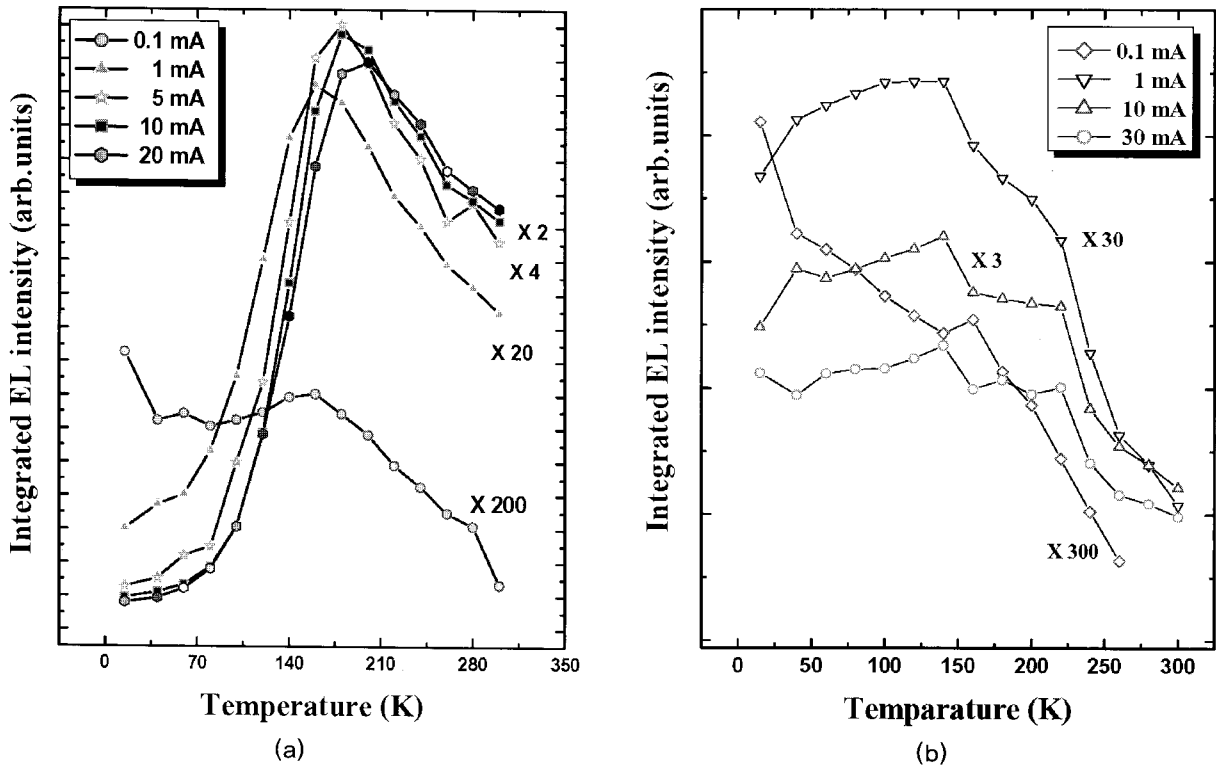


Figure 2. Temperature dependence of the integrated EL intensity for the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW structures at different injection current: (a) the blue MQW structure and (b) the green MQW structure.

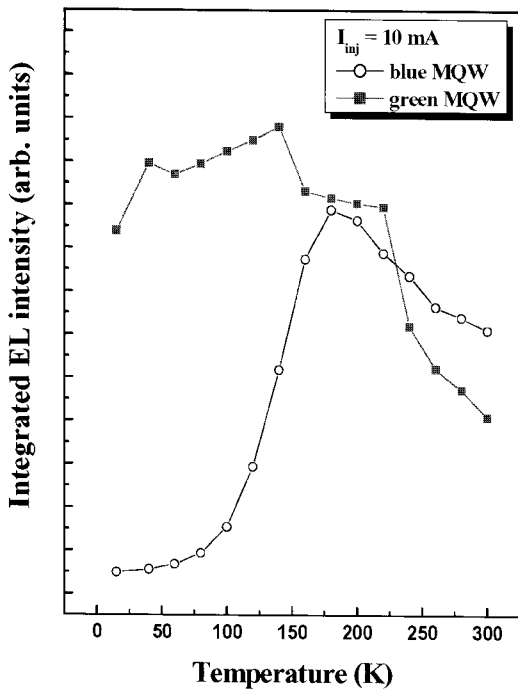


Figure 3. Wavelength-integrated EL intensity of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW structures as a function of temperature. Injection current level used for this plot is 10 mA.

저 전류를 주입 할 경우에는 순방향 구동 전압이 낮아 감소된 비방사 재결합과 활성층에 의한 효율적인 캐리어 포획 때문에 온도가 감소함에 따라 EL 세기가 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 주입 전류가 클 경우 즉, 순방향 구동 전압이 클 때는 140 K이하의 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 외부장(external field)의 효과로 설명될 수 있다 [18-19]. 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. 그러나 저온에서 주입 전류가 크면 캐리어 포획 능력이 떨어져서 EL 효율이 떨어지는 것은 저온에서는 상온에서 주입시켜준 동일한 주입 전류에 대해서 상온 보다 높은 전압을 걸어줘야 하기 때문이다. 더 큰 전류를 주입시키기 위해서는 높은 전압을 인가해

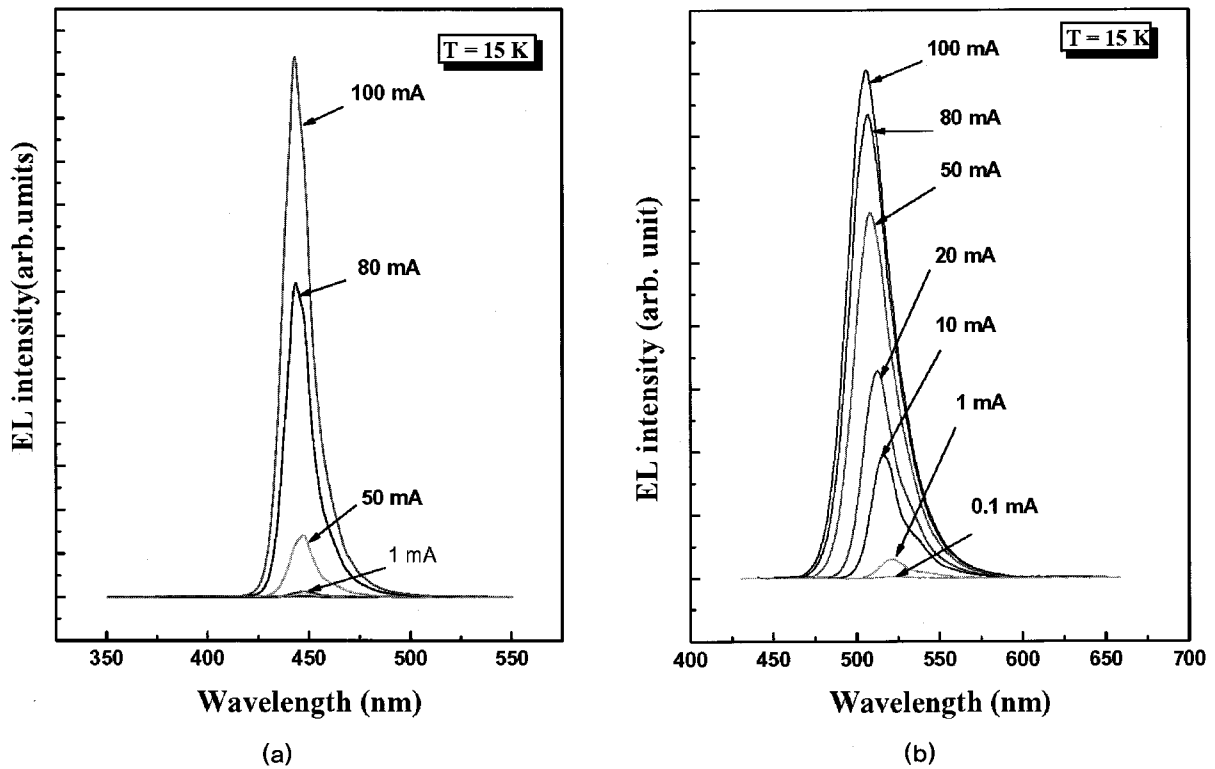


Figure 4. The EL spectra for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW structures with increasing the injection current from 0.1 mA to 100 mA: (a) the blue MQW structure and (b) the green MQW structure.

야만하고 이로 인하여 양자 우물 내에 구속되는 캐리어가 터널링 될 수 있는 가능성도 커진다. 그리하여 우물에서의

캐리어 누설이 발생하게 되고 EL 효율이 떨어지게 되는 것이다 [20]. 그리고 전류가 증가하게 되면 thermal effect가 증가하게 되어 efficiency가 감소하게 된다 [21]. 따라서 Fig. 3에서와 같이 저온에서의 EL 효율이 청색 발광 다중 양자우물 구조가 녹색 발광 다중 양자우물 구조에 비해 좋지 않은 경우이다 [22].

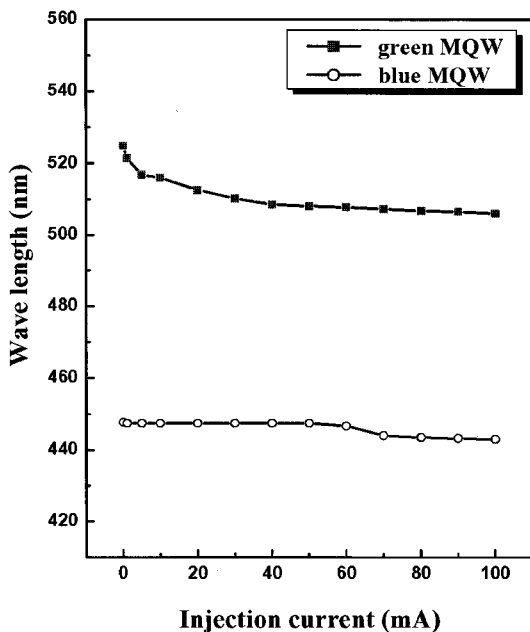


Figure 5. The blue shift for the green MQW structure and the blue MQW structure.

Fig. 4의 (a)와 (b)에서는 15 K에서 주입 전류를 0.1 ~ 100 mA까지 변화시키면서 각각의 변화를 나타낸 것이고, 주입 전류의 변화에 따른 EL 피크 에너지의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 주입전류의 증가에 따라 EL 신호 전체가 증가하면서 고에너지 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 녹색 발광 다중 양자우물 구조의 경우는 약 80 meV 청색편이 하였고, 청색 발광 다중 양자우물 구조의 경우는 약 22 meV정도 청색편이 하였다. 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 전도대와 가전자대의 subband top에 있는 캐리어들 사이에서 재결합이 일어나게 되므로

EL 신호가 고에너지 쪽에서 발생하게 되며, 주입전류의 세기가 증가할수록 subband의 높은 에너지 위치까지 채워지게 되므로 고 에너지 쪽으로 EL 신호가 발생하는 것이다 [23]. 이러한 subband는 깊은 준위의 결함이나 불순물 또는 InGaN 양자우물의 두께와 In 조성으로 인한 퍼텐셜 요동(potential fluctuation) 등에 의한 원인들을 고려하여야 한다 [24-26]. 그리고 양자우물의 폭 의존성 실험의 경우는 우물의 폭이 클수록 양자속박효과가 더 강하다는 것이 밝혀진 바 있다 [27].

IV. 결 론

MOCVD법으로 성장된 In_xGa_{1-x}N/GaN 다중 양자우물 구조의 온도와 주입전류 변화에 따른 특성을 EL 스펙트럼 측정을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저전류와 고전류 주입시 EL 효율의 온도 의존 변화는 매우 다르게 나타나는데, 이러한 온도와 전류의 변화에 의한 독특한 EL 효율의 변화는 내부전기장의 존재 하에 순방향 바이어스에 기인한 외부전기장의 영향인 것으로 볼 수 있다.
- 2) EL 효율은 조성비에 따른 양자우물의 깊이 차이에 의하여 녹색 발광 다중 양자우물 구조의 경우가 청색 발광 다중 양자우물 구조 보다 상대적으로 더 좋은 EL 효율을 보였다.
- 3) 전류 의존성 실험을 통해 청색 발광 다중 양자우물 구조 및 녹색 발광 다중 양자우물 구조의 blue shift는 각각 약 22 meV 및 80 meV이었다. 이것은 녹색 발광 다중 양자우물 구조가 청색 발광 다중 양자우물 구조에 비해 더 큰 양자속박 효과가 작용하고 있기 때문이다.

참고문헌

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L1332 (1995).
- [2] 이상준, 김준오, 김창수, 노삼규, 임기영, *한국진공학회지*16, **27** (2007).
- [3] 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).
- [4] 이창명, 이주인, 임재영, 신은주, 김선운, 서준호, 박근섭, 이동한, *한국진공학회지*10, **67** (2001)
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] D. C. Look, H. Lu, W. j. Schaff, J. Jasinski, and Z. L. Weber, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 258 (2002).
- [8] H. Lu, W. J. schaff, J. Hwang, H. Wu, G. Koley, and L.F. Eastman, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1489 (2001).
- [9] T. Inushima, V. V. Mamutin, V. A. Vekshin, S. V. Ivanov, T. Sakon, M. Motokawa, and S. Ohoya, *J. Cryst. Growth* **481**, 227 (2001).
- [10] A. M. Yong, C. B. Soh, X.H. Zhang, S. Y. Chow, and S. J. Chua, *Thin Solid Films* **515**, 4496 (2007).
- [11] L. W. Ji, T. H. Fang, and T. H. Meen, *Phys. Lett.* **A355**, 118 (2006).
- [12] 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).
- [13] X. A. Cao, S. F. Leboenf, K. H. Sandvik, E. B. Stokes, A. Ebong, D. Walker, J. Kretchmer, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *Solid-state. Electron.* **46**, 2291 (2002).
- [14] C. M. Lee, C. C. Chuo, J. F. Dai, X. F. Zheng, and J. I. Chyi, *J. Appl. Phys.* **89**, (2003).
- [15] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 981 (1997).
- [16] A. Vertikov, A. V. Nurmikko, K. Doverspike, G. Bulman, and J. Edmond, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 493 (1998).
- [17] K. Domen, A. Kuramata, and T. Tanahashi, *Appl.*

- Phys. Lett. **72**, 1359 (1998).
- [18] P. Bakmiwewa, A. Hori, A. Satake, and K. Fujiwara, Physica E **21**, 636 (2004).
- [19] J. S. Im, H. Kollmer, J. Off, A. Sohmer, F. Scholz, and A. Hangleiter, Physics. Rev. B **57** R9435 (1998).
- [20] P. Bakmiwewa, A. Hori, A. Satake, and K. Fujiwara, Physica E **21**, 636 (2004).
- [21] C.C. Pan, C.M. Lee, J.W. Liu, G.T. Chen, and J.I. Chyi, Appl. Phys. Lett. **84**, 5249 (2004).
- [22] A. Hori, D. Yasunaga, A. Satake, and K. Fujiwara, Appl. Phys. Lett. **79**, 3723 (2001).
- [23] T. Mukai, K. Takekawa, and S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys.(Part 2) **37**, L839 (1998)
- [24] S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. **69**, 4188 (1996).
- [25] Y. Narakawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, Phys. Rev. **B55**, R1938 (1997).
- [26] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. **70**, 981 (1997).
- [27] X. H. Zhang, W. Liu, and S.J. Chua J. Crystal Growth **88**, 4729 (2000).

Study of Optical Properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Multi-Quantum-Well

Ki-Hong Kim, In-Su Kim^{*}, ^aHun-Bo Park, ^aIn-Ho Bae, ^aJae-In Yu, and ^bYoon-Seok Jang

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

^aDepartment of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749,

^bDepartment of Ophthalmic optics, Taegu science college, Daegu 702-723

(Received October 18, 2008, Revised December 3, 2008, Accepted January 13, 2009)

Temperature and injection current dependence of electroluminescence(EL) spectral intensity of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multi-quantum wells(MQW) have been studied over a wide temperature range and as a function of injection current level. It is found that a temperature-dependent variation pattern of the EL efficiency under very low and high injection currents shows a drastic difference. This unique EL efficiency variation pattern with temperature and current can be explained field effects due to the driving forward bias in presence of internal(piezo and spontaneous polarization) fields. Increase of the indium content in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum wells gives rise to a redshift of 80 meV and 22 meV for green and blue MQW, respectively. It can be explained by carrier localization by potential fluctuation of multiple quantum well and MQW structures also shows a keen difference owing to the different indium content in InGaN/GaN MQW.

Keywords : $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, Multiple quantum well, Electroluminescence

* [E-mail] iskim@ikw.ac.kr