

1×1 mm² 대면적 녹색 LED의 전기 광학적 특성 분석

장이운^a · 조동섭^a · 전주원^a · 안태영^a · 박민주^b · 안병준^c
송정훈^c · 곽준섭^b · 김진수^a · 이인환^a · 안행근^{a*}

^a전북대학교 신소재공학부, 전주 561-756

^b순천대학교 인쇄전자공학과, 순천 540-742

^c공주대학교 물리학과, 공주 314-701

(2011년 5월 30일 받음, 2011년 6월 25일 수정, 2011년 6월 30일 확정)

본 논문은 InGaN/GaN 다중양자우물 구조를 가지는 녹색 발광다이오드의 활성층 내 인듐(In) 조성비와 piezoelectric field에 대한 전계 흡수 현상을 연구하였다. 활성층 내 결정학적 성질과 In 조성비는 double crystal X-ray diffraction 측정으로 분석하였으며, 1×1 mm² 대면적 칩을 제작하여 발광특성을 조사하였다. 또한, 활성층 내 piezoelectric field는 electro-reflectance spectroscopy로부터 측정한 compensation voltage를 이용해 계산하였고, 인가전압에 따른 photocurrent의 변화를 측정함으로써 녹색 발광 소자의 전기 광학적 특성을 분석하였다.

주제어 : 유기화학증착법, 발광다이오드, 압전계, 전기 반사율, 광전류

I. 서 론

GaN 기반의 화합물 반도체는 가시광 영역대의 파장을 방출하는 특성과 우수한 열적, 전기적 특성으로 인해 light emitting diodes (LEDs), laser diodes 및 다양한 전자소자 분야에 널리 적용되고 있어, GaN에 대한 전기광학적 특성에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 [1-4]. 특히, 최근에 가시광 영역의 높은 흡수율과 에너지 변환 효율을 바탕으로 태양전지 등 수광 소자 [5-7]에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있지만, 실제 소자 응용에 있어 중요한 요인 중 하나인 전계 흡수 현상에 대한 연구는 상대적으로 미진한 상황이다.

GaN 기반 소자의 전계 흡수 현상을 연구하기 위해서는 반도체 구조와 내부 전계에 대한 이해가 필요하다. 보통 GaN 기반의 반도체는 c면-사파이어 기판 위에 성장이 되는데, GaN와 사파이어 기판의 격자 부정합과 성장 중의 열팽창 계수 차이 등에 의해 성장되는 GaN 반도체 내부에 분극 현상 (polarization)이 일어난다 [8]. 특히, 이러한 분극 현상은 분극의 불연속면 (discontinuity)과 더불어 다중양자우물 (multiple quantum wells, MQWs)의 조성 변화 (compositional changes) 로 인하여 더욱 강화되며 [9], 이로 인해서 활성층 내에 piezoelectric field가 형성되어 에너지 밴드가

기울어지게 된다. 이러한 활성층 내에 형성된 piezoelectric field와 In 조성비는 광학적 특성뿐만 아니라 전계 흡수 현상에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 소자를 제작할 시 정확하게 계산될 필요가 있다. 그 동안 GaN 기반 소자의 piezoelectric field에 대한 정보와 특성을 분석하기 위하여, 소자에 전계를 인가함과 동시에 광학적 특성을 측정하는 연구 결과가 보고되었다 [8-13]. 소자에 역전압을 인가하여 밴드가 flat되는 V_{comp}를 구하고, 이와 동시에 흡수 혹은 반사율을 측정하여 소자 내부의 정확한 piezoelectric field를 계산하는 방법이지만 대부분 15% 정도의 In 조성비를 갖는 청색 LED에 대한 연구가 집중되었다.

본 논문에서는 InGaN/GaN MQWs 가지는 녹색 LED를 사용하여 활성층 내의 In 조성비와 piezoelectric field를 각각 DCXRD와 electro-reflectance 결과로부터 계산하였으며, 인가전압에 따른 photocurrent를 측정하여 전계 흡수 현상에 대해 연구하였다.

II. 실험방법

InGaN/GaN MQWs 가지는 녹색 발광다이오드는 금속

* [전자우편] ahnhk@jbnu.ac.kr

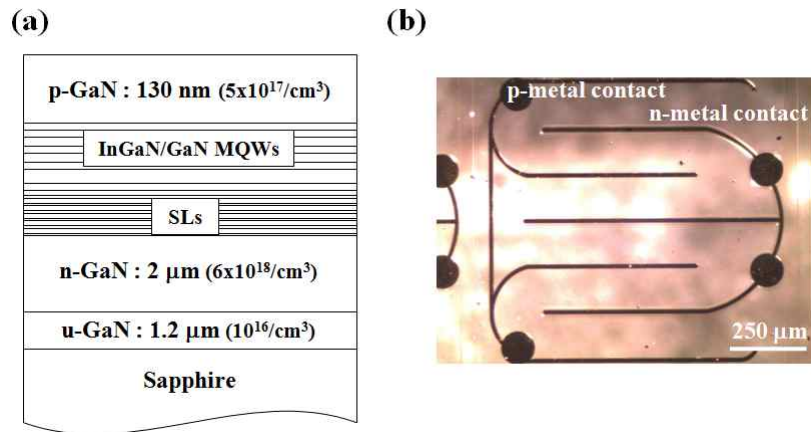


Figure 1. (a) Schematic sample structure and (b) optical microscope image at the dimension of 1x1 mm² for the InGaN/GaN MQW green LED.

유기화학증착법(MOCVD)으로 성장되었으며, Ga, In, N의 원료로써 trimethylgallium, trimethylindium과 NH₃을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 녹색 발광다이오드 구조를 제작하기 위하여 먼저 1,100°C 에서 10분간 열처리한 c-plane 사파이어 기판 위에 저온에서 GaN 버퍼층을 성장하였고, 그 위에 1.2 μm 두께의 undoped GaN 층과 2 μm 두께의 n-GaN 층을 1,060°C에서 성장하였다. 그 이후에 2 nm 두께로 10 pair의 InGaN/GaN superlattice 구조를 성장하였고, 그 위에 5 pair의 InGaN/GaN 활성층을 성장하였다. InGaN/GaN 활성층 중 InGaN well은 716°C에서 3 nm 두께로 성장하였고, GaN barrier는 850°C에서 14 nm 두께로 성장하였다. 마지막으로 MQW 위에 960°C에서 130 nm 두께의 p-type GaN 층을 성장하였다. p-type 도핑을 위한 불순물인 Mg의 전기적 활성화를 위해 600°C, 질소분위기에서 10분 동안 열처리를 실시하였다.

위와 같은 과정으로 제작된 녹색 발광다이오드의 결정학적 특성과 활성층 내의 In 조성은 double crystal X-ray diffraction (DCXRD) 방법으로 분석하였고, 전기광학적 특성은 electroluminescence (EL), electro-reflectance (ER), 및 photocurrent 측정으로 조사하였다. EL 측정을 위한 전류 주입형 LED 소자의 제작은 다음과 같다. 먼저, photo-resist와 developer를 이용한 photo-lithography로 상부 p-type GaN층에 mesa etching을 위한 패턴을 형성하였고, Freon-12 (CCl₂F₂) 플라즈마를 이용한 reactive ion etching (RIE) 장비로 mesa etching을 실시하였다. electron-beam과 thermal evaporation을 이용해 ITO와 금속을 각각 증착하였다. Ni/Au (10/100 nm)를 사용해 p-type metalliza-

tion을 형성하였으며, Ti/Al (10/100 nm)을 사용해 n-type metallization을 형성하였다. 마지막으로 금속과 반도체 사이의 ohmic 접촉을 위하여 600°C에서 1분 동안 급속열처리를 실시하였다. 이렇게 제작된 1×1 mm² 대면적 green LED의 도면을 Fig. 1(a)에 나타내었으며 Fig. 1(b)는 제작된 chip의 광학현미경 사진을 보여준다.

III. 실험결과 및 고찰

일반적으로 GaN 기반 소자의 광학적 특성은 활성층에 걸려있는 piezoelectric field와 In 조성비에 의해 영향을 받게 된다 [11-13]. 이는 발광 소자뿐만 아니라 수광소자 등의 특성에 영향을 미치는 주요한 요인으로 GaN 기반 소자를 제작하는데 있어 정확한 값을 계산하는 것이 필요하다. 활성층 내 In 조성비는 발광 소자의 에너지 밴드갭을 결정하게 되고, 청색 LED의 경우 약 15%의 In 조성비를 갖는다고 보고되고 있다 [13]. 그러나 청색 LED에 비해 장파장에서 빛을 발광하는 녹색 LED는 청색 LED보다 높은 In 조성비가 요구된다. 본 연구에서 제작된 녹색 LED의 In 조성비를 확인하기 위하여 InGaN/GaN MQWs의 (0002) 반사면에 대한 XRD rocking curves를 측정하였다(Fig. 2). As-grown GaN의 경우 $\Theta=17.3^\circ$ 에서 GaN peak이 나타나며, In이 포함되면 peak 분리가 발생하여 In 조성비가 증가할수록 15.7°의 InN에 가까워지게 된다 [12,13]. 이 때 나타나는 peak을 0th order peak이라고 하며, MQW의 두께와 위성 peak의 등분리 간격으로부터 시편의 평균 In 조

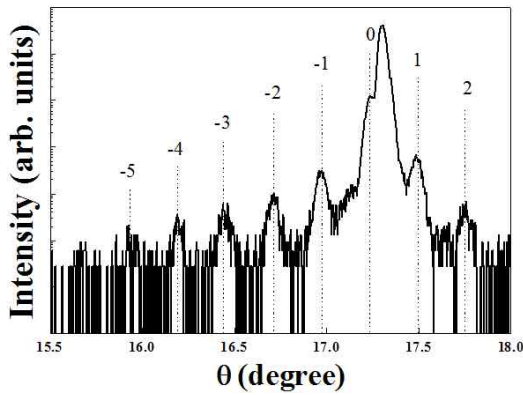


Figure 2. DCXRD curve of the green InGaN/GaN MQW.

성비를 구할 수 있다 [14]. MQW 아래에 삽입된 InGaN/GaN superlattice의 In 조성비는 수 % 내외로 매우 적기 때문에 XRD 상에서 0th order peak 위치에 미세한 영향을 미치게 된다. 하지만 peak shift의 변화는 매우 작고 superlattice가 없는 conventional LED와 비교하였을 때 MQWs의 주기성 및 경향성에 영향을 미치지 않기 때문에, 측정된 XRD 결과로부터 MQWs의 In 조성비와 결정성을 계산하였다 [15]. Fig. 2에 나타낸 DCXRD 결과에 의해 녹색 LED의 In 조성비는 23.9%으로 계산되며, 주기적으로 나타난 위성 peak의 형태로부터 성장된 LED의 well과 barrier의 계면이 급격하며 smooth하게 성장되었다는 것을 확인하였다 [16].

23.9%라는 비교적 높은 In 조성비에 맞게 제작된 LED는 약 500 nm에서 발광하는 특성(Fig. 3(a) inset)을 나타내었으며, 제작된 LED의 turn-on voltage는 약 2.6 V의 낮은 값을 나타내며, 20 mA의 전류를 인가했을 때 3.1 V의 V_f 값을 보여주었다. 0 mA에서 300 mA까지 전류의 증가에 따라 light output은 점차 증가하였으며(Fig. 3(b)), 이때 파장은 70 mA가 인가될 때까지 17 nm 정도 blue-shift하였다(Fig. 3(c)). 이 blue-shift는 piezoelectric field의 screening effect에 의해 기인된 것으로 [17], 전류 주입으로 인해 발광 소자의 활성층에 주입된 전자와 정공들이 전자기장을 형성하고, 이 전기장은 내부 응력장의 방향과 반대 방향으로 형성되기 때문에 piezoelectric field가 감소하도록 작용하여 발광 파장이 blue-shift하게 되며, 70 mA 이상에서 전류가 인가되었을 때 piezoelectric field가 포화되었음을 의미한다. 그러나 이런 peak 위치의 변화는 buffer 층이나 interlayer 같은 내부 구조, In 조성비뿐만 아니라 주입된 캐리어들의 band filling effect [17]에 따라

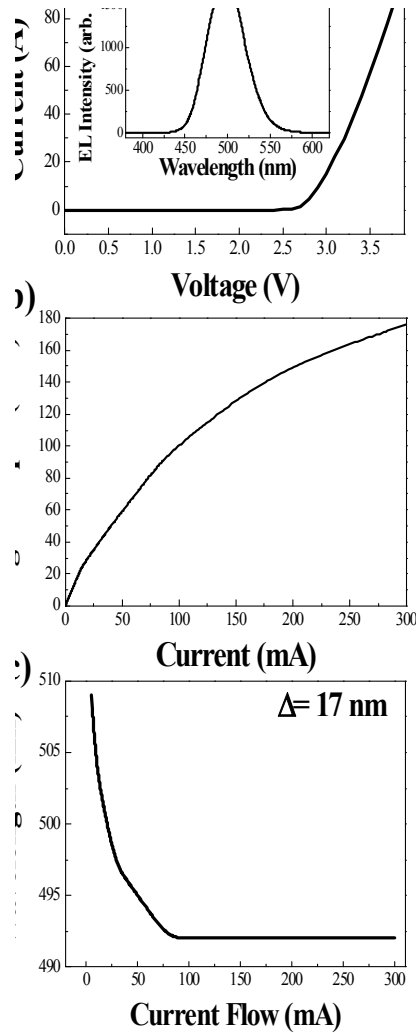


Figure 3. Optical characteristics of the green LED (a) I-V curve and EL spectra (inset), (b) L-I curve, and (c) peak position with current injection.

서도 영향을 받기 때문에, peak 위치만으로 활성층에 걸린 piezoelectric field를 분석하는 것은 한계가 있다.

최근에 GaN 내부의 piezoelectric field를 정확히 계산하기 위한 방법으로 electro-reflectance 방법이 보고되었다 [12,13]. 이는 소자에 역전압을 걸어주면서 반사율을 측정하는 방법으로, 역전압을 인가할 때 기울어진 에너지 밴드가 점점 flat하게 되며 임계점을 넘으면 다시 반대로 에너지 밴드가 기울어지게 되는데 이때 에너지 밴드 근처에서 반사율이 역전하는 현상이 발생되고 이를 측정함으로써 정확한 piezoelectric field를 계산할 수 있다 [12]. Fig. 4는 녹색 LED의 piezoelectric field를 측정하기 위한 ER spectra 결과이다. 인가된 역전압의 증가에 따라 ER signal

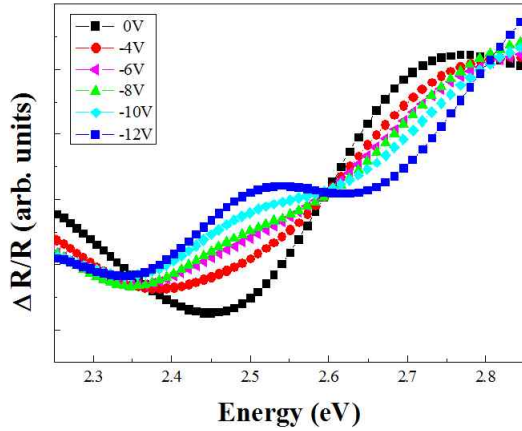


Figure 4. ER spectra as a function of applied reverse voltage.

이 flat해지고 -6 V 이후에는 signal의 위상이 역전되는 것을 볼 수 있다. 그리고 -6 V 값을 compensation voltage (V_{comp})라고 하며 활성층의 piezoelectric field는 아래의 수식을 바탕으로 계산할 수 있다 [14].

$$F_{pz}(V_{comp}) = \frac{q}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} d_b + \frac{q}{\epsilon} \times \sqrt{\frac{N_a^2 N_d^2}{(N_a + N_d)^2} dbar^2 + \frac{2e(V_{bi} + V_{comp})}{q} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

여기에서 N_a , N_d , and F_{pz} 는 억셉터와 도너의 농도 그리고 piezoelectric field를 나타내며, d_b , V_{bi} , ϵ 및 q 는 barrier 층의 두께, cladding layer의 도핑 농도로부터 얻은 built-in potential, 유전율 및 단위전하량이다. 이 식을 바탕으로 녹색 LED 활성층에 걸린 piezoelectric field는 7.9 MV/cm로 계산되었다. 일반적으로 청색 LED의 piezoelectric field는 약 4 MW/cm 이내의 값으로 보고되고 있지만, 녹색 LED는 상대적으로 In 조성비가 높기 때문에 청색 LED보다 piezoelectric field가 높은 값을 나타낸다.

전계흡수 과정에서 생성되는 캐리어와 그 거동을 확인하기 위하여 Photocurrent spectroscopy를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 결과를 토대로 역전압이 걸리지 않았을 때, 즉 활성층에 걸린 piezoelectric field에 의해 에너지 밴드가 기울어진 상태(0 V)와 에너지 밴드가 flat하게 되는 역전압 V_{comp} (-6 V)에서 측정을 한 결과, 0 V의 전압에서 2.5 eV 부근에서 current가 증가하게 되는데 이는 에너지 밴드가 이 부근에 위치하고 있어 광을 흡수하여 캐리어가 발생되기 때문이다. 반면에 V_{comp} 를 인가

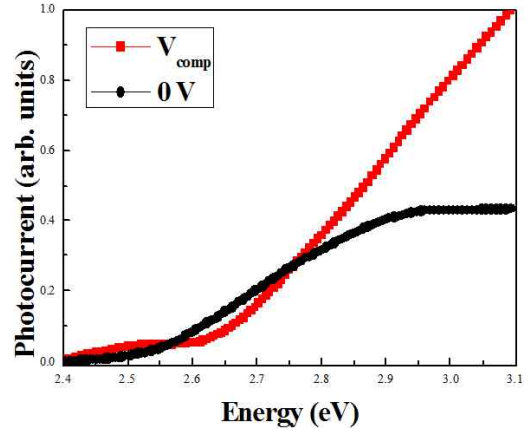


Figure 5. Photo-current spectra of the green InGaN/GaN MQW at 0 V and V_{comp} .

해 주었을 때 에너지 밴드가 약 0.1 eV 정도 blue-shift하였으며, 3.1~2.4 eV의 영역에서의 photocurrent는 67% 증가하였다. 이 결과는 V_{comp} 에서는 에너지 밴드가 퍼지기 때문에 유효 에너지 밴드갭이 커지게 되어 단파장에서 흡수가 발생하고 흡수 효율이 증가했음을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MOCVD로 성장된 녹색 LED를 이용하여 전기광학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. DCXRD 측정 결과에 의해 본 연구에서 제작된 녹색 LED의 활성층 내 In 함량이 약 23.9%였으며, ER spectroscopy 측정 결과로부터 발광 소자에 걸린 piezoelectric field는 7.9 MV/cm였다. 또한, 에너지 밴드가 퍼지는 V_{comp} 에서 캐리어의 발생이 67% 증가하였고 발광파장이 약 0.1 eV blue-shift하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-614-D00017).

참고문헌

[1] S. Nakamura, Science **281**, 956 (1998).

- [2] K. -H. Kim, I. -S. Kim, H. -B. Park, I. -H Bae, J. -I. Yu, and Y. -S. Jang, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 37 (2009).
- [3] Z. Lei, G. Xia, L. Ting, G. Xiaoling, L. Q. Ming, and S. Guangdi, *Microelectron. J.* **38**, 1 (2007).
- [4] F. Sacconi, M. Povolotskyi, and A. D. Carlo, *J. Comput. Electron.* **5**, 115 (2006).
- [5] J. Y. Wang, F. J. Tsai, J. J. Huang, C. Y. Chen, N. Li, Y. W. Kiang, and C. C. Yang, *Optics Express* **18**, 2682 (2010).
- [6] Y. Kuwahara, T. Fujii, Y. Fujiyama, T. Sugiyama, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, *Appl. Phys. Express* **3**, 111001 (2010).
- [7] V. Pota, I. M. Tiginyanu, V. V. Ursaki, O. Volcius, and H. Morkoc, *Semicond. Sci. Technol.* **21**, 12 (2006).
- [8] P. Kiesel, F. Renner, M. Kneissl, N. M. Johnson, and G. H. Dohler, *Phys. Stat. Sol. (a)* **188**, 131 (2001).
- [9] J. E. Cunningham, *Mater. Sci. Eng.* **25**, 155 (1999).
- [10] E. Sari, T. Ozel, A. Koc, J. W. Ju, H. K. Ahn, I. H. Lee, J. H. Baek, and H. V. Demir, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 201105 (2008).
- [11] T. Ozel, E. Sari, S. Nizamoglu, and H. V. Demir, *J. Appl. Phys.* **102**, 113101 (2007).
- [12] J. H. Song, Y. Q. Dong, H. J. Kim, B. J. Ahn, T. S. Kim, S. K. Hong, H. K. Yuh, S. C. Choi, Y. B. Moon, S. K. Shee, J. H. Lee, and J. H. Song, *Phys. Status Solidi RRL* **4**, 8 (2010).
- [13] S. M. Kim, H. S. Oh, J. H. Baek, K. H. Lee, G. Y. Jung, J. H. Song, H. J. Kim, B. J. Ahn, D. Yanqun, and J. H. Song, *IEEE El. Dev. Lett.* **31**, 8 (2010).
- [14] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, S. Nagahama, and N. Iwasa, *J. Appl. Phys.* **74**, 6 (1993).
- [15] J. W. Ju, E. S. Kang, H. S. Kim, L. W. Jang, H. K. Ahn, J. W. Jeon, and I. H. Lee, *J. Appl. Phys.* **102**, 53519 (2007).
- [16] J. W. Ju, J. Zhu, H. S. Kim, C. R. Lee, and I. H. Lee, *J. Korean. Phys. Soc.* **50**, 3 (2007).
- [17] N. Nanhui, W. Huaibing, L. Jianping, L. Naixin, X. Yanhui, H. Jun, D. Jun, and S. Guangdi, *Sol. Stat. Elec.* **51**, 860 (2007).

Electro-Optical Characteristics and Analysis of $1 \times 1 \text{ mm}^2$ Large-Area InGaN/GaN Green LED

L. W. Jang^a, D. S. Jo^a, J. W. Jeon^a, Tae-Young Ahn^a, M. J. Park^b,
B. J. Ahn^c, J. H. Song^c, J. S. Kwak^b, Jin-Soo Kim^a, I. -H. Lee^a, and H. K. Ahn^{a*}

^a*School of Advanced Materials Engineering and Research Center of Advanced Materials Development,
Chonbuk National University, Jeonju 561-756*

^b*Department of Printed Electronics Engineering, Sunchon National University, Suncheon 540-742*

^c*Department of Physics, Kongju National University, Kongju 314-701*

(Received May 30, 2011, Revised June 25, 2011, Accepted June 30, 2011)

We investigated the effects of piezoelectric field on the electro-absorption characteristics in InGaN/GaN multiple-quantum well (MQW) green light emitting diodes (LED). Double crystal X-ray diffraction measurement was performed to study the crystalline property and indium (In) composition in the MQW active layer. To measure the electro-luminescence and electro-reflectance (ER) spectroscopy, we fabricated the $1 \times 1 \text{ mm}^2$ large-area green LED chip. The piezoelectric field inside the LED structure was evaluated from the V_{comp} in active layer by the ER spectra. Finally, we analyzed the electro-absorption characteristics of the green LED by using the photo-current spectroscopy.

Keywords : Metal-organic chemical vapor deposition, Light emitting diodes, Piezoelectric field, Electro-reflectance, Photo-current

* [E-mail] ahnhk@jbnu.ac.kr