

## 하부 광결정에 따른 InGaN/GaN 양자우물구조의 청색발광 다이오드 발광 특성

조성남, 최재호, 김근주  
전북대학교 기계공학과

### Bottom photonic crystals-dependent photoluminescence of InGaN/GaN Quantum-Well Blue LEDs

Sung Nam Cho, Jaeho Choi and Keunjoo Kim  
Chonbuk National University

**Abstract :** The authors investigated the InGaN/GaN multi-quantum well blue light emitting diodes with the implements of the photonic crystals fabricated at the top surface of p-GaN layer or the bottom interface of n-GaN layer. The top photonic crystals result in the lattice-dependent photoluminescence spectra for the blue light emitting diodes, which have a wavelength of 450nm. However, the bottom photonic crystal shows a big shift of the photoluminescence peak from 444 nm to 504 nm and played as a role of quality enhancement for the crystal growth of GaN thin film. The micro-Raman spectroscopy shows the improved epitaxial quality of GaN thin film.

**Key Words :** photonic crystals, photoluminescence, blue LED, InGaN/GaN multi-quantum well

#### 1. 서 론

고체 광원으로서는 발광다이오드(light emitting diode: LED)는 적은 전력소모에 큰 발광효율이 장점이지만, 내부 양자효율 (90%) 에 비해 외부 양자효율 (10%) 이 매우 낮은 구조적인 문제점이 있다. 외부 양자효율이 낮은 이유는 광소자 (optoelectronic devices)에 사용된 반도체 물질들의 상대적으로 큰 굴절을 때문이다. 외부 양자효율은 LED 자체의 발광효율을 결정하므로 이를 개선하기 위해 광결정(photonic crystals), 이나 나노 크기의 표면 거칠기를 이용하여 외부 양자효율을 높이려는 연구가 시도되고 있다.

본 연구에서는 LED의 빛 방출 효율을 증가시키기 위해 E-beam nano-lithography로 p-GaN 층에 230, 460, 690, 920 nm 격자상수를 갖는 150 nm 직경의 구멍으로 패턴화한 상부 광결정을 만들어 photoluminescence (PL)을 측정했다. 그리고 또한 LED full 구조를 n-GaN층에 형성된 하부 광결정 위에 형성하였다. n-GaN층에 E-beam nano-lithography를 이용하여 구멍직경 150nm, 격자상수 230 nm의 하부 광결정을 만들었다. 이렇게 제작된 LED 구조에 대한 PL을 측정하였으며, 상부 광결정의 PL에 대한 격자영향과 하부 광결정이 LED 발광 특성 및 결정특성에 미치는 영향을 파악하였다.

#### 2. 실험

LED 구조는 유기금속 화학기상 증착법 (metalorganic chemical vapor deposition: MOCVD)에 의해서 사파이어 기판위에 성장되었다. 상부 광결정을 4종류의 격자상수로도

한 하부 광결정을 1 종류의 230 nm의 격자상수로 제작하였다.

상부 광결정을 갖는 LED 제작은 기판위에 520°C 에서 완충층을 30nm 두께로 성장시키고 n-type GaN을 1130°C 에서 3 $\mu$ m의 두께로 증착시켰다. 450 nm의 청색파장을 방출하는 다중양자우물(multiple quantum well: MQW)은 2 nm 높이의 wells와 8 nm 높이의 barriers를 반복적으로 성장시켜 만들었다. 이 MQW층은 790°C 에서 성장시키고 같은 온도에서 8 주기의 InGaN well과 GaN barrier를 성장시켰다. 마지막으로 200 nm의 p-type GaN층을 1130°C에서 성장시킨 다음 700°C 에서 15분간 후속 열처리 하였다.

이러한 LED구조의 광소자 위에 삼각격자로 구성된 2차원 광결정을 격자상수 230, 460, 690, 920nm, 구멍직경 150nm로 일정하게 제작하였다. 이 광결정은 p-GaN상에 E-beam nano-lithography와 inductively coupled plasma(ICP) 식각공정을 통하여 만들었다. 150 nm의 직경과 일정한 주기성을 가진 원형 구멍의 crystal격자의 형태는 질화물 표면위에 도포된 polymethylmethacrylate (PMMA)에 형성되었다. E-beam nano-lithography공정에서 표면이 전자빔에 노출되어 형성된 패턴은 methylisobutyl ketone과 isopropyl alcohol 용액에 의해서 현상된다. 다음 건식 식각공정은 ICP 건식 식각장치를 이용하여 5초 동안 수행했다.

하부 광결정을 갖는 LED 제작은 520°C에서 MOCVD를 사용하여 사파이어 기판위에 30 nm 두께로 GaN 완충층을 성장시킨다. 그 위에 1130°C에서 n-GaN층을 2  $\mu$ m 두께로 증착한다. n-GaN층 표면은 PMMA 포토레지스트로 두께가 200 nm가 되도록 도포한다. 구멍직경 150 nm, 격자상수

230 nm를 갖는 패턴을  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 의 크기로 PMMA 포토 레지스트 위에 E-beam nanolithography를 이용하여 생성한다.  $\text{BCl}_3$ 와  $\text{Cl}_2$ 의 혼합 고밀도 플라즈마로 5 초 동안 ICP 건식 에칭을 한 후 남아 있는 PMMA를 제거한다. 여기에  $1 \mu\text{m}$  n-GaN을 증착하고 이후 공정은 p-GaN 상에 광결정 생성을 제외한 상부 광결정 LED 제작 공정과 동일하다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 격자상수 230, 460, 690 과 960 nm를 갖는 상부 광결정을 형성한 LED에 대한 AFM 사진이다. 광결정 형상은 끝자리 모양의 구멍 주위에 4 개의 송곳 같은 기둥을 가지고 있다. 평균 직경과 구멍의 깊이는 각각 150, 28 nm이며 구멍의 상/하부 직경은 각각 223/108 nm 이다.

Fig. 2는 광결정의 격자상수에 따른 PL spectra를 보여준다. InGaN/GaN MQW 구조로부터 빛의 파장이 450 nm 인 청색이 방출하며 PL 세기는 광결정 시료에서 두 배로 증가함을 확인하였다. 광결정 시료에서 PL의 세기가 증가하는 현상은 비교적 굴절율이 높은 반도체 표면에서 빛이 전반사 되지 않도록 표면에 공기구멍을 형성함으로써 연속적으로 굴절율을 변화시킨 결과이며 빛의 표면 방출효율을 증대시켰기 때문이다. 또한 격자주기와 발광파장의 주기가 보강간섭을 일으킬 수 있는 범위에서 광결정이 형성되었기 때문이다.

Fig. 3은 n-GaN층에 포토레지스트의 선택비가 적어 하부 광결정이 형성되어지지 않고 불규칙적인 표면 조도로 식각된 경우(시료 A1)와 격자상수 230 nm의 하부 광결정이 형성된 경우(시료 B1)에 대한 AFM 사진이다. 시료 B1은 나노구멍 깊이가 10 nm 정도로 매우 얇다.

Fig. 4는 하부 광결정이 없는 LED구조(시료 A1)와 230 nm 격자상수의 하부 광결정 위에 형성한 LED구조(시료

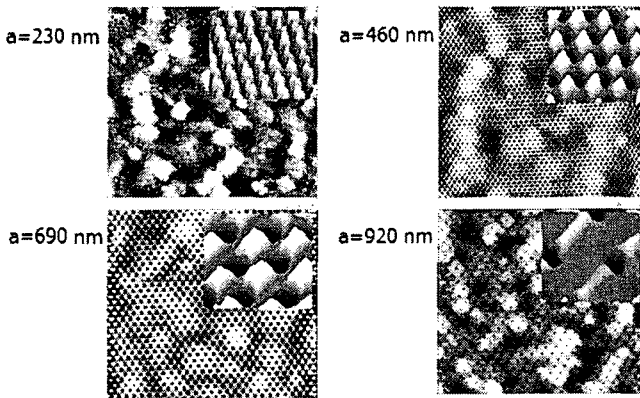


Fig 1. 격자상수에 따른 상부 광결정구조의 AFM 사진

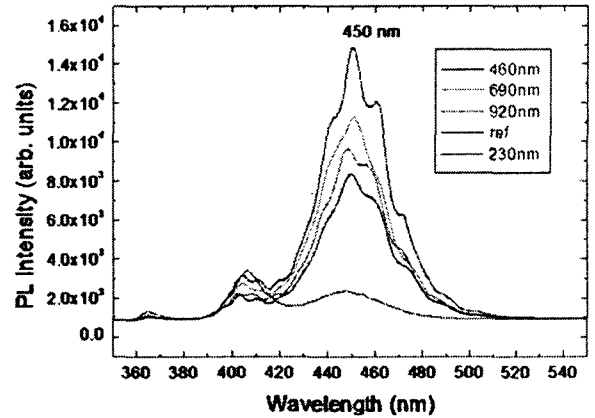


Fig 2. 상부 광결정을 갖는 LED의 PL spectra

B1)로부터 발광하는 PL spectrum을 보여준다.

Fig. 4는 하부 광결정이 없는 LED구조(시료 A1)와 230 nm 격자상수의 하부 광결정 위에 형성한 LED구조(시료 B1)로부터 발광하는 PL spectrum을 보여준다. 하부광결정이 없는 n-GaN 부위에 성장된 LED구조에서는 양자우물구조로부터의 444 nm 파장의 청색광과 567 nm의 장파장을 갖는 등색광이 발광된다. 이러한 장파장의 발광은 아마도 n-GaN층위에 GaN 완충층을 다시 형성함에 따른 결정질의 전위에 관련된 발광특성으로 사료된다. 또한 이러한 장파장은 하부 광결정이 형성된 부위에서도 같은 발광특성을 보이며 피크는 567 nm 이다.

시료 A1의 양자우물층의 발광 파장이 444 nm 로부터 504 nm의 장파장으로 적색천이하고, 시료 B1의 경우에는 444 nm 파장에서 394 nm의 파장으로 청색천이를 보인다. 이러한 반대방향으로 천이는 매우 흥미로운 결과를 주며, 특성평가를 필요로 한다. 특히 나노구조의 표면조도를 갖는 경우의 기판과의 격자부정합이 줄어들 수 있기 때문에 결정질의 형성에 있어서 In 함량의 변화가 예상되며, 요철의 표면에 양자점 결정질 형성도 예상되어진다.

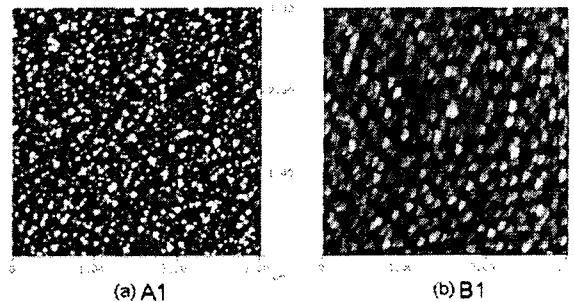


Fig 3. (a) n-GaN 위에 하부 광결정의 형상이 보이지 않고 표면조도를 갖는 시료와 (b) 하부 광결정이 형성된 시료의 AFM 사진

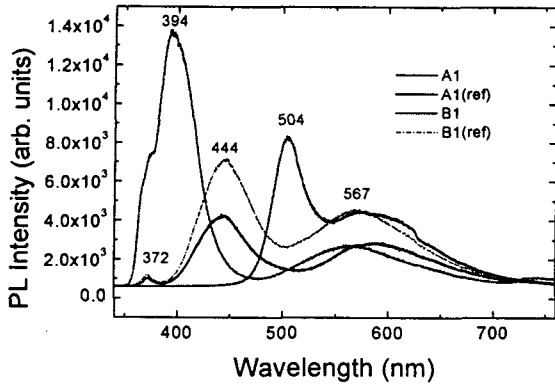


Fig 4 하부 광결정을 갖는 LED의 PL spectra

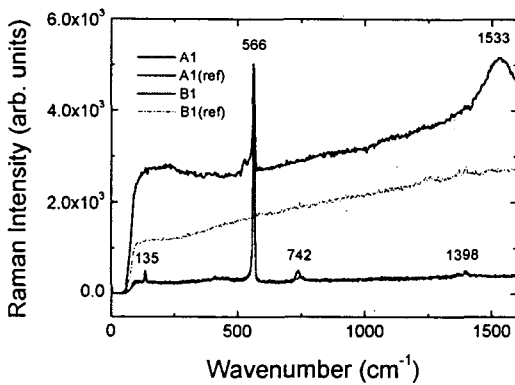


Fig 5. 하부 광결정 위에 성장한 LED구조의 Micro-Raman spectra

Fig. 5는 n-GaN층에 표면조도가 커진 A1 시료와 하부 광결정 위에 성장된 LED구조 B1 시료에 대한 마이크로-라만 분광특성을 나타낸다. 두 시료 모두에서 LED구조의 Ga-N의 원자결합에 관련된  $566\text{ cm}^{-1}$ 의 피크가 주위의 기준 부위에서 보다 훨씬 큰 세기를 보임을 알 수 있다. 또한  $135\text{ cm}^{-1}$ 의 미세피크와  $742\text{ cm}^{-1}$ 의 피크도 보여 결정질이 표면조도나 하부 광결정으로 인해 향상됨을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전자빔 나노리소그래피 공정을 이용하여 청색 발광다이오드구조의 상부와 하부에 광결정을 형성하여 발광특성을 조사하였다. AFM 이미지 분석결과, 광결정이 양호하게 형성되었음을 알 수 있었다. 또한 PL 발광특성을 분석하여 상부 광결정의 격자상수에 따른 발광세기의 변화를 관찰하였다. 하부 광결정을 형성하여 그 위에 LED구조를 형성한 경우, 조사한 PL 발광특성으로부터 하부 광결정이 결정성장에 있어서 사파이어기판과 GaN

박막 사이의 격자부정합에 따른 전위형성에 영향을 끼침을 알 수 있었다. 특히 PL 피크가  $445\text{ nm}$ 에서  $504\text{ nm}$ 로 이동되는 형상을 보이며, 마이크로 라만분광 특성으로부터  $135\text{ cm}^{-1}$ 의 피크가 형성되고 큰 In 함량의 InGaN 박막층이 형성됨을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 (KRF-2007-521-D00188) 지원에 의해 수행한 것입니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. H. Choi, K. J. Kim Jour. of the Semi. & Dis. Equip. Tech. Vol. 5. No. 2. 2006
- [2] K. J. Kim, J. H. Choi, S. C. Jeon, J. S. Kim, H. M. Lee Appl. phys. Lett. vol. 90 p. 18115 2007
- [3] K. J. Kim, J. H. Choi, J. B. Park, S. C. Jeon, J. S. Kim, H. M. Lee IEEE Photon. tech. vol. 20, no.17, p.1455, 2008
- [4] J. M. Park, J. K. Oh, K. W. Kwon, Y. H. Kim, S. S. Jo, J. K. Lee, S. W. Ryu IEEE Photon. Tech. Lett. Vol. 20, No. 4, p. 321 2008