

금속배선 칩 집적공정을 포함하는 질화물 반도체 LED 광소자 특성 연구

김근주[†] · 양정자*

[†]*전북대학교 기계공학과

A Study on the III-nitride Light Emitting Diode with the Chip Integration by Metal Interconnection

Keun joo Kim[†] and Jeong Ja Yang*

[†]*Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

A blue light emitting diode with 8 periods InGaN/GaN multi-quantum well structure grown by metal-organic chemical vapor deposition was fabricated with the inclusion of the metal-interconnection process in order to integrate the chips for light lamp. The quantum well structure provides the blue light photoluminescence peaked at 479.2 nm at room temperature. As decreasing the temperature to 20 K, the main peak was shifted to 469.7 nm and a minor peak at 441.9 nm appeared indicating the quantum dot formation in quantum wells. The current-voltage measurement for the fabricated LED chips shows that the metal-interconnection provides good current path with ohmic resistance of 41 Ω .

Key Words : Blue LED, Metal interconnection, Photoluminescence, Electroluminescence

1. 서 론

발광 다이오드(light emitting diode: LED) 램프는 자외선을 이용하는 형광등과 뜨거운 적외선 영역의 열을 발산하는 백열전구의 중간과장 영역인 가시광선 영역의 파장을 가질 수 있어 고휘도 백색구현이 용이하다. 일본 니치아화학에서 청색 LED위에 형광물질인 YAG(Yttrium Aluminum Garnet)을 도포하여 백색 LED를 제조하였다[1, 2]. 이러한 청색 LED에 바탕을 둔 백색 광소자는 연색지수(rendering index)가 낮아 형광등처럼 발광과장을 자외선으로 하는 자색(violet) LED의 연구를 촉진시켰다[3]. 질화물 반도체에 기초한 GaN계 반도체에 청색을 구현하기 위해서는 In을 추가시킨 InGaN 삼원 합금층을 GaN과 교대로 적층하여 InGaN/GaN 다중양자우물구조(multi-quantum well structure: MQW)의 발광층을 형성하며, 자색의 경우는 Al을 포함하는 AlGaN삼원 합금층을 GaN과 교대로 적층하여 AlGaN/GaN다중양자우물구조의 발광층을 형

성하게 된다[4].

본 연구에서는 백색조명 LED를 구현하기 위한 기초 연구 일환으로 청색LED 소자에 필요한 반도체 박막을 형성하고 칩과 칩 사이의 금속배선으로 칩을 집적화 시키는데 필요한 공정을 수행하였다. 먼저 에피박막을 성장하였으며, 금속배선 공정을 포함하는 형태의 칩 집적화 제조공정을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1. 박막 증착공정

사파이어 기판 위에 Fig. 1과 같이 청색 발광다이오드 박막구조를 형성한다. 유기금속화학물 화학 기상증착 방법(metal-organic chemical vapor deposition: MOCVD)을 이용하여 제일 먼저 520°C의 온도에서 500 Torr 가스압력으로 GaN 완충층을 350 Å 두께로 증착한다. 이 완충층은 1055°C의 고온에서 성장하는 GaN 에피층의 핵형성 에너지를 낮추어 3차원 에피층 성장을 억제하고 2차원 횡방향으로의 결정성장을 촉진하는 역할을 한다[5].

[†]E-mail : kimk@chonbuk.ac.kr

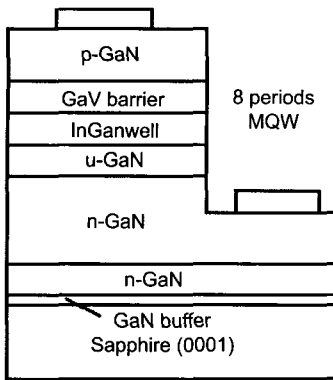


Fig. 1. Schematic diagram of blue LED epitaxial structure.

Fig. 2의 공정 파라미터 요약에서와 같이 완충층위에 도핑되지 않은 GaN층을 1 μm의 두께로 성장시켜 n-형 오믹 접촉층에서 전자를 공급할 때 사파이어 기판 쪽으로 전하이동을 방지할 수 있다. 이어서 Si이 도핑된 GaN층을 2 μm의 두께로 박막을 성장시킨다. 양자 우물 발광활성층을 성장시키기 위해 200 Torr 가스압력에서 720°C 온도로 Si이 도핑되지 않은 GaN층을 150 Å로 성장한다. 또한 상기 층위에 청색발광 활성층으로 InGaN/GaN 다중양자우물구조를 80/20Å 두께로 8주기 성장시키며, 그 위에 Mg이 도핑된 GaN층을 200 nm 두께로 1020°C 온도에서 200 Torr 압력으로 성장한다. 이러한 Mg도핑된 GaN층을 p-형 오믹접촉용 GaN층으로 전기적 활성화되도록 하기 위해 800°C에서 10분 동안 급속 열처리(rapid thermal process: RTP)를 수행하였다[6].

p-GaN layer (0.12 μm), P _g =200Torr, T _g =1020 C, f(TMGa)=293 μmol/min, f(Cp2Mg)=15.6 μmol/min, NH ₃ =171/min	
MQW barrier Time=250 sec	P _g =200Torr T _g =720 C f(TMGa)=98 μmol/min NH ₃ =30 l/min
x8 MQW well layer Time=35 sec f(TMIn)=120 μmol/min	
u-/n-/u-GaN layer, Time=80/90/80 sec SiH ₄ =791 nmol/min	
n-GaN contact layer (2 μm), P _g =500 Torr, T _g =1055C, f(TMGa)=444 μmol/min, NH ₃ =251/min, SiH ₄ =638 nmol/min	
Undoped GaN (1 μm), P _g =500 Torr, T _g =1055C, f(TMGa)=444 μmol/min, NH ₃ =251/min	
GaN Nucleation layer (350 Å), P _g =500 Torr, T _g =520C, f(TMGa)=84 μmol/min, NH ₃ =301/min	
Sapphire	

Fig. 2. Growth conditions for blue LED in MOCVD on pressures, gas flow rates and growth temperatures.

2.2. 칩 제조공정

성장된 에피웨이퍼를 칩 상태로 제조하기 위해서 에피층 식각, 투명전극 증착, n-형 전극 및 금속배선 증착, 절연막 증착, p-형 전극 및 금속배선 증착, 보호막 증착 등의 공정을 수행하였다.

에피층 식각공정에서는 n-형 전극의 오믹접촉층을 노출시키기 위한 공정으로 사파이어 기판이 절연체이기 때문에 상부에 두 전극을 형성하게 된다. 이는 마치 실리콘의 집적공정과 유사한 형태가 된다. 먼저 표면을 아세트산과 메탄올 및 순수수로 초기세정을 한 다음 불산 용액에서 10분간 전처리하고 포토레지스트(P/R)를 코팅하고 노광시켜 현상하였다. 그 다음, Cl₂/BCl₃(30/15 sccm) 가스분위기에서 플라즈마 식각공정을 수행한 다음 P/R를 제거하였다.

투명전극공정에서는 초기세정과 왕수처리 후에 포토공정을 수행한 다음, 불산 및 온수처리 후에 Ni/Au(20/60 Å) 층을 e-beam 증착하였다. Lift-off 공정을 아세트산, DPS-1000N 및 IPA치환으로 수행한 후 오믹 열처리를 550°C에서 N₂ 분위기에서 1분간 수행하였다.

N-형 금속배선 증착 공정은 초기세정 및 포토공정을 수행하고 불산 및 온수처리를 수행한 다음, Ti/Al(200/5000 Å)를 열증기 증착하였다. Lift-off공정을 수행하고서 오믹 열처리를 수행하였다.

절연층 증착 공정은 온수처리를 포함하는 초기세정 후, SiO₂ 층을 플라즈마증착(PECVD) 방법으로 700 Å 증착하였다. P/R이 증착후 제거가 용이하도록 HMDS [hexamethyldisilazane: {(CH₃)₂Si₂NH}] 를 코팅하고 소프트 베이킹한 다음, P/R을 코팅하여 노광 및 현상을 하였다. 절연막을 RIE(reactive-ion beam etching) 식각하였다. P/R를 제거하고 플라즈마 에칭(ashing)을 수행하고 300°C에서 2분 동안 열처리를 수행하였다.

P-형 금속 배선 증착공정에서는 초기세정후 Ni/Au (30/1200 nm)층을 e-beam 증착한다 다음 Lift-off공정 및 열처리공정을 수행하였다. 마지막으로 보호막 증착 공정은 상기 절연막 공정과 동일하게 수행하였다.

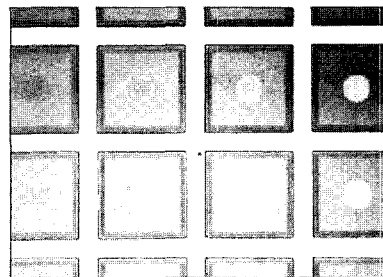


Fig. 3. Fabricated blue LED chips on wafer.

3. 결과 및 고찰

박막의 특성 및 제작된 소자 특성을 평가하기 위해 광학적 특성으로 photoluminescence(PL), 전기적 특성으로는 I-V특성 및 구조적 특성으로는 TEM이미지를 관찰하였다. Fig. 4는 웨이퍼 상의 LED 칩에 대한 PL 발광 특성을 온도 변화에 따라 측정하였다. 주 피크의 파장은 479.2 nm 이며, 측정온도를 저온으로 변화시키면 따라 청색편이를 보이며, 20 K에서는 469.7 nm파장을 보인다. 저온에서 441.9 nm 파장을 갖는 새로운 부 피크가 생기는데 150 K 온도이하에서 현저하게 나타난다.

이러한 PL피크의 생성은 발광 활성층내의 새로운 발광원 존재를 암시하는데 부 피크의 반폭치는 64 meV 로 주피크의 113 meV보다 매우 작음을 알 수 있다. 이는 양자우물내에 양자점(quantum dot)이 형성되는 경우로 전자구속 상태가 증대되며 반폭치가 줄어드는 새로운 발광원의 존재를 의미한다. 이러한 양자점의 존재여부에 대해 구조적 특성을 분석하기 위해 TEM을 사용하였다.

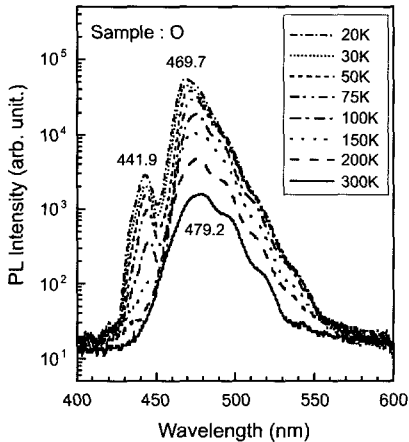


Fig. 4. Photoluminescence spectra of LED chips on wafer for various temperatures.

Fig. 5는 다중양자우물구조에 대한 마이크로 TEM 이미지에 대한 것으로서 bright field 이미지에서 사파이어 기판과 GaN 에피박막층의 계면에서 시작된 threading edge 전위가 양자우물층을 통과하여 표면에 이르게 됨을 잘 보여 준다[7]. 전위밀도는 대략적으로 $6 \times 10^8 / \text{cm}^2$ 으로 매우 높지만 발광 메커니즘에 대한 영향이 매우 적은 편이다. 참고로 GaAs계 광소자의 경우는 $10^4 / \text{cm}^2$ 의 매우 적은 전위밀도만으로도 발광메커니즘에 대한 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

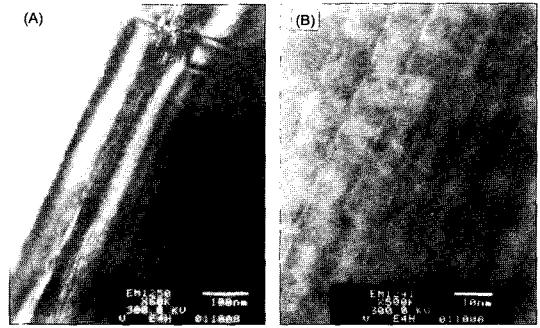


Fig. 5. Micro-TEM images for (a) bright field and (b) high resolution modes on the MQW layers.

이러한 고밀도의 전위는 직경 350-400 nm의 육각기둥형(Hexagonal columnar structure)이 형성되기 때문이다. 즉, 사파이어 기판위에 격자부정합이 13%인 GaN 박막을 형성할 때에, 먼저 GaN 완충층(buffer layer)으로 핵을 형성하여 반구(hemisphere) 상태로 횡방향의 결정성장을 진행하면서 이웃 반구와 만나 경계상의 원자적 단차를 이루어 edge 전위가 형성되기 때문이다[8].

고분해능을 갖는 TEM이미지는 8 nm폭의 띠형상의 양자장벽과 2 nm폭을 갖는 선 모양의 양자우물이 교번하여 성장된 상태로 양자우물 주위의 불규칙적인 콘트라스트가 보이며 이는 InGaN층의 양자우물과 GaN층의 양자장벽사이에 격자간의 스트레스가 작용함을 의미한다. 특히 이러한 콘트라스트는InGaN합금의 우물층 주위에 In 양이 공간상에서 불균일하게 분포함을 암시한다[9]. 이러한 불균일성은 수 nm 크기의 입자상의 응집효과를 주게 되며, 양자우물내에 양자점의 형성을 가져오게 된다. 양자점은 양자우물보다 전자 구속효과가 크게 되어지고 전자와 정공의 재결합효과를 비교적 크게 증대시킨다[10, 11].

Fig. 6은 제작된 청색 LED광소자의 전류-전압(I-V) 특성을 나타낸다. 같은 에피박막을 두개로 분리시켜 하나는 기존의 칩 공정으로 금속배선없이 개별칩으로 분리시킨 상태로 제작한 LED(disc. LED)와 본 연구에서 금속배선으로 칩들을 서로 연결시키는 구조를 갖는 경우에 대해 한 개 칩만 측정된 상태의 LED(integ. LED)를 서로 비교하였다. 전압측정에서 동일한 p-형 전극핀을 연결하지만, n-형 전극은 개별칩에 대해서는 직접 연결하고 집적칩에 대해서는 전류가 금속배선상의 도선을 타고 여러 칩들을 거쳐서 들어오는 차이가 있다. 칩 내의 에피층의 전기적 저항 특성을 나타내는 정적 저항(static resistance)은 각각192와 203 Ω 을 나타내며,

20 mA의 구동전류에서 동작 전압은 3.7와 3.9V를 갖는다. 또한 n-형 및 p-형 오믹접촉 특성을 나타내는 20 mA에서 곡선의 기울기를 나타내는 동적 저항(dynamic resistance)은 32와 41Ω으로 비교적 동일한 작은 저항 값을 갖는다.

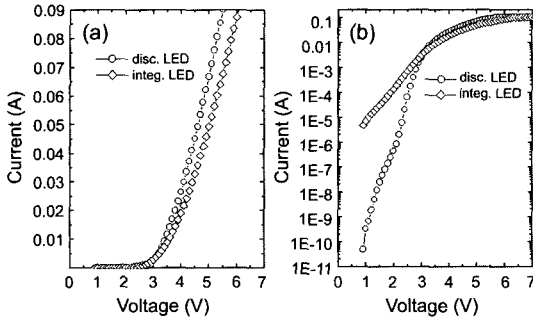


Fig. 6. I-V characteristics of LED chips on wafer for various chips: (a) the curves at turn-on voltage and (b) the curves on carrier tunneling.

전압인가의 초기상태에서 로그형태의 I-V곡선에서 보면, 1 V의 저전압 영역에서 전류흐름은 현저한 차이를 보인다. 동일한 p-형 전극면적 $1.28 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 에 대해 종래의 개별 칩 형태의 LED는 10^{-10} A를 흐르게 하며 전류의 터널링 현상을 보인다[12]. 하지만, 집적 칩 LED는 10^{-5} A가 흘러 많은 확산형 누설전류특성을 나타내는 차이점을 보인다. 이러한 차이점에도 불구하고 동작전압 주위의 I-V특성은 매우 양호하여 금속배선의 집적화 공정의 가능성을 확보하였다. Fig. 7은 집적화된 웨이퍼상의 집적칩으로부터 고휘도 전기발광(electroluminescence: EL)이 가능함을 보여주는 사진이다.



Fig. 7. Electroluminescence from an LED chip on wafer.

4. 결 론

본 연구에서는 조명램프로 활용가능성을 파악하기 위하여 질화물반도체의 청색 LED 에피박막을 MOCVD

로 성장하였으며, 금속배선을 포함하는 칩 집적공정을 수행하였다. 성장된 에피박막의 발광특성은 상온에서 479.2 nm의 청색 스펙트럼을 보이며, 저온 측정시에는 주피크가 청색 천이함을 알 수 있었다. 또한 양자우물구조에 부 피크 441.9 nm가 발견되었으며, 이는 양자 우물층내의 양자점 구조를 포함하는 불균일성에 기인하며 TEM이미지로부터 확인하였다. 결론적으로 금속배선 집적화 공정을 수행하여도 전기적 특성이 양호하며, 낮은 동적저항을 갖음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2003년도 한국에너지관리공단 학술진흥사업(2003-E-EL03-P-01-0-000)의 지원연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Nakamura, S. Mukai, T. and Senoh, M., "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1687-1689, 1994.
2. Nakamura, S. Mukai, T. Senoh, M. and Iwasa, N., "High-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-green-light-emitting diodes", *J. Appl. Phys.* Vol. 76, 8189-8191, 1994.
3. Gardner, N. F. Chui, H. C. Chen, E. I. Krames, M. R. Huang, J-W. Kish, F. A. Stockman, S. A. Kocot, C. P. Tan, T. S. and Moll, N., "1.4×efficiency improvement in transparent-substrate $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ light-emitting diodes with thin ($\leq 2000 \text{ \AA}$) active regions", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, pp. 2230-2232, 2000.
4. Nam, K. B. Li, J. Nakarmi, M. L. Lin, J. Y. and Jiang, H. X., "Unique optical properties of AlGaIn alloys and related ultraviolet emitters", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 84, pp. 5264-5266, 2004.
5. Yamamoto, A. Tsujino, M. Ohkubo, M. and Hashimoto, A., "Nitridation effects of substrate surface on the metalorganic chemical vapor deposition growth of InN on Si and $(-\text{Al}_2\text{O}_3)$ substrates", *J. Cryst. Growth* Vol. 137, pp. 415-420, 1994.
6. Nakamura, S. Senoh, S. Iwasa, N. and Nagahama, S. "High-Brightness InGaIn Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 34, L797-L799, 1995.
7. Rawdanowicz, T. A. and Narayan, J., "Epitaxial GaN on Si(111): Process control of SiNx interlayer formation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, pp. 133-135, 2004.

8. Ponce, F. A., "Introduction to nitride semiconductor blue lasers and light emitting diodes", Ed. By Nakamura, S. and Chichibu, S. F., (Taylor & Francis, London and New York 1999) p. 123.
9. Chichibu, S. F. Wada, K. and Nakamura, S. "Spatially resolved cathodoluminescence spectra of InGaN quantum wells", Appl. Phys. Lett., Vol. 71, pp. 2346-2348, 1997.
10. Narukawa, Y. Kawakami, Y. Fujita, Sz. Fujita, Sg. and Nakamura, S., "Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm", Appl. Phys. Lett., Vol. 70, pp. 981-983, 1997.
11. Kiesielowski, C. Liliental-Weber, Z. and Nakamura, S., "Atomic Scale Indium Distribution in a GaN/In_{0.43}Ga_{0.57}N/Al_{0.1}Ga_{0.9}N Quantum Well Structure", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, pp. 6932-6935, 1997.
12. Casey, H. C. Jr. Muth, J. Krishnankutty, S. and Zavada, J. M., "Dominance of tunneling current and band filling in InGaN/AlGaN double heterostructure blue light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 68, pp. 2867-2869, 1996.