

Growth of InGaN/AlGaN heterostructure by mixed-source HVPE with multi-sliding boat system

K.S. Jang, K.H. Kim[†], S.L. Hwang, H.S. Jeon, W.J. Choi, M. Yang, H.S. Ahn, S.W. Kim*, J. Yoo**, S.M. Lee** and M. Koike**

Department of Applied Sciences, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea

**Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., Suwon 443-743, Korea

(Received June 9, 2006)

(Accepted August 11, 2006)

Abstract The selective growth of InGaN/AlGaN light emitting diodes was performed by mixed-source hydride vapor phase epitaxy (HVPE). In order to grow the InGaN/AlGaN heterostructure consecutively, a special designed multi-sliding boat was employed in our mixed-source HVPE system. Room temperature electroluminescence spectrum of the SAG-InGaN/AlGaN LED shows an emission peak wavelength of 425 nm at injection current 20 mA. We suggest that the mixed-source HVPE method with multi-sliding boat system is possible to be one of the growth methods of III-nitrides LEDs.

Key words HVPE, LED, SAG, EL, I-V, InGaN/AlGaN heterostructure, Multi-sliding boat system

Multi-sliding boat 방식을 이용한 혼합소스 HVPE에 의한 InGaN/AlGaN 이중 접합구조의 성장

장근숙, 김경화[†], 황선령, 전현수, 최원진, 양민, 안형수, 김석환*, 유재은**, 이수민**, M. Koike**

한국해양대학교 반도체물리학과, 부산, 606-791

*안동대학교 물리학과, 안동, 760-749

**삼성전기, 수원, 443-743

(2006년 6월 9일 접수)

(2006년 8월 11일 심사완료)

요약 혼합소스 HVPE(hydride vapor phase epitaxy) 방법으로 InGaN/AlGaN의 이중접합구조(heterostructure)의 LED(light emitting diode)를 선택성장(SAG : selective area growth)하였다. InGaN/AlGaN 이중접합구조를 혼합소스 HVPE로 연속 성장하기 위하여 새로운 디자인의 multi-sliding boat를 도입하였다. SAG-InGaN/AlGaN LED의 상온 EL(electroluminescence) 특성은 주입전류가 20 mA일 때 중심파장은 425 nm였다. Multi-sliding boat를 이용한 혼합소스 HVPE 방법이 질화물 반도체 LED를 성장하는 유용한 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

III-V족 질화물 반도체는 직접 천이형의 넓은 띠 간격의 특성을 지니고 있어 광소자와 고온·고출력 전자소자, 고이동도 트랜지스터(HEMT : high electron - mobility transistor) 등 응용분야가 매우 다양하다[1-3]. 특히 광·전자소자분야에 있어 질화물 반도체의 적용이 가능해 짐

으로서 GaN 계열의 화합물 반도체와 구조에 대한 연구·개발이 활발히 진행 중에 있다[4]. 대부분의 질화물 반도체와 관련된 연구개발 및 소자의 제작은 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)나 MBE (molecular beam epitaxy)를 이용하여 이루어지고 있다[5]. HVPE(hydride vapor phase epitaxy) 방법은 빠른 성장 속도의 이점을 가지고 있기 때문에 질화물 반도체 성장에 있어 후막 성장부분에 매우 중요한 위치에 있다. 그리고 HVPE 방법은 비교적 낮은 비용으로 박막 성장 시 불순물 농도가 낮은 고순도 에피층을 성장시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

[†]Corresponding author

Tel: +82-51-410-4781

Fax: +82-51-404-3986

E-mail: kimkh@bada.hhu.ac.kr

한편 결정질을 개선시키는 방법의 한가지로 선택 성장 방법이 있다. 선택 성장법은 SiO₂ 마스크가 기판으로부터의 결함 전달을 차단하기 때문에 결함밀도(dislocation density)를 줄여 결정질을 개선시킬 수 있다[6-8]. 또한 선택성장은 건식 에칭(dry etching)에 비하여 기판에 손상이 적고 오염을 줄일 수 있는 장점이 있다. Usui 등은 HVPE 방법으로 SiO₂ 마스크를 이용하여 결함밀도가 10⁷ cm⁻²인 GaN의 성장을 보고한 바 있다[9].

본 논문에서는 HVPE 방법의 장점인 후막성장과 새로운 multi-sliding boat를 도입하여 얇은 층 성장을 가능하게 함으로써 이 방법이 광소자 제작에 유용한 방법임을 제시하고자 한다.

InGaN/AlGaN의 이종접합구조는 금속 Ga에 금속 Al, In, Mg이나 Si를 직접 녹여 HCl과 반응시키는 혼합소스 HVPE 방법으로 형성되었다[10]. Multi-sliding boat를 이용한 혼합소스 HVPE 방법으로 성장시킨 SAG(selective area growth)-InGaN/AlGaN LED(light emitting diode)의 특성은 EL과 전류-전압(I-V) 측정을 통하여 평가하였다.

2. 실험

InGaN/AlGaN의 이종접합구조는 상압이 유지되는 수평형 반응관에서 multi-sliding boat를 이용한 혼합소스 HVPE 방법으로 성장되었다. 금속 Ga과 NH₃가 precursor로 사용되었고 캐리어 가스로 N₂를 사용하였다. Multi-sliding boat의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 각각의 well은 소스가 서로 섞이지 않도록 칸막이로 완전히 분리되었다. 본 논문에서는 n형 도핑과 p형 도핑을 하기 위하여 단결정 Si과 금속 Mg을 이용하였다. 보트의 첫 번째 well에는 n-AlGaN 층의 성장을 위한 (Ga + Al + Si)의 혼합소스, 두 번째 well에는 InGaN 층의 성장을 위한 (Ga + In)의 혼합소스가 들어있다. 그리고 세 번째 well에는 Mg-doped AlGaN 층의 성장을 위한 (Ga + Al + Mg)의 혼합소스, 네 번째 well에는 Mg-doped GaN 층의 성장을 위한 (Ga + Mg)의 혼합소스가 들어있다. 각 층의 성장은 boat의 뚜껑에 부착된 HCl관을 이동시켜 well의 개폐를 조절한다. 열려진 well 안의 혼합소스와 HCl은 화학반응을 하고 나머지 well들은 뚜껑으로 완전

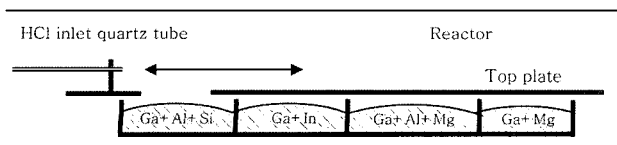


Fig. 1. The mixed-source HVPE with the multi-sliding boat system.

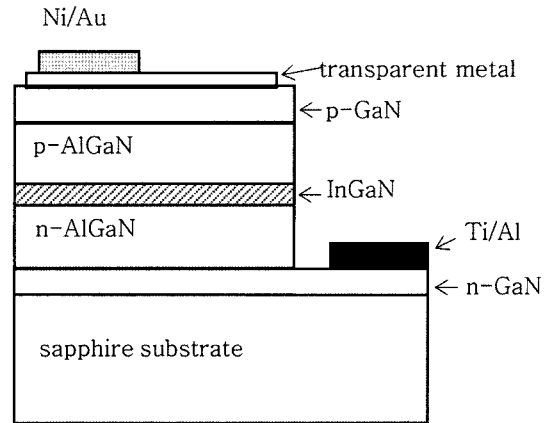


Fig. 2. The schematic structure of the SAG-InGaN/AlGaN LED.

히 덮여있어 다른 well의 혼합소스에 의한 영향은 차단 되도록 고안하였다.

InGaN/AlGaN LED의 이종접합구조 성장을 위하여 n-GaN이 성장된 sapphire(0001) 기판을 사용하였다. SiO₂ 막은 RF sputter로 5000 Å 정도의 두께로 증착시켰다. LED 패턴은 SiO₂ 마스크 위에 일반적인 포토공정과 습식에칭 공정으로 형성하였다. Si-doped Al_xGa_{1-x}N(x~16%)의 n-cladding 층은 1090°C에서 SAG-pattern의 window 영역에 성장하였다. 그리고 In_xGa_{1-x}N(x~12%)의 활성층은 990°C에서 성장하였고 Mg-doped Al_xGa_{1-x}N(x~16%)의 p-cladding 층과 Mg-doped GaN의 p-capping 층은 각각 1090°C와 1050°C에서 성장하였다.

SAG-InGaN/AlGaN LED의 구조는 Fig. 2에 나타내었다. 투명전극의 ohmic 형성을 위하여 p-GaN의 표면에 Ni/Au(35/35 Å)를 O₂ 분위기에서 열처리하였다. 그 위에 다시 p-전극의 형성을 위하여 Ni/Au를 150/500 Å 증착하였다. n-전극형성을 위하여 LED 이종접합구조를 성장한 뒤 SiO₂를 제거하고 드러난 n-GaN 층 위에 Ti/Al을 500/500 Å 증착하였다. 이 시료는 600°C의 N₂ 분위기에서 열처리하였다. 제작된 LED의 전기·광학적 특성상은 EL과 I-V 측정을 통하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

Multi-sliding boat를 이용하여 혼합소스 HVPE로 성장시킨 SAG-LED의 단면 SEM 사진을 Fig. 3에 나타내었다. SAG-InGaN/AlGaN LED 이종접합구조의 각 층은 7.2 μm 두께의 Si-doped Al_xGa_{1-x}N(x~16%)의 n-cladding 층과 0.2 μm 두께의 In_xGa_{1-x}N(x~12%)의 활성층, 1.6 μm 두께의 Mg-doped Al_xGa_{1-x}N(x~16%)의 p-cladding 층 그리고 0.6 μm 두께의 Mg-doped GaN의 p-capping 층으로 구성되어있다. 사진에서 볼 수 있듯이

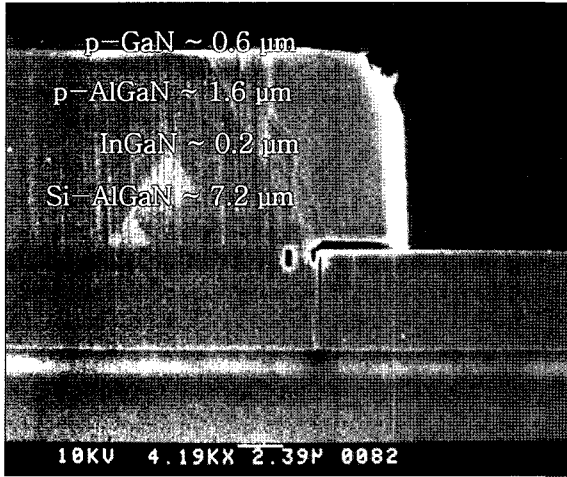


Fig. 3. Typical cross-sectional SEM image of SAG-InGaN/AlGaN LED grown by the mixed-source HVPE method with multi-sliding boat system.

SiO₂ 마스크막과 선택 성장된 LED 구조가 아주 잘 분리되어 있으며 LED 구조의 측면은 전체두께가 10 μm 정도로 90° 정도의 각으로 선택 성장되어 있음을 확인할 수 있다.

Si-doped AlGaN 층의 캐리어 농도는 (Ga + Al + Si)의 혼합소스 안의 Si 원자분율에 의존한다. 본 연구에서 Si-doped AlGaN의 캐리어 농도는 $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 에서 $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 까지 변화시킬 수 있었으며 측정에 사용된 LED에서는 그 농도가 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 가 되도록 조절하였다. 일반적으로 MOCVD 방법에 있어서 n형 도핑은 SiH₄을 주로 사용하고 있으며 도핑농도는 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이상으로 가능한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 Si의 원자분율에 의하여 도핑농도가 최대 $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 까지 제한된 것은 Al의 조성이 높고 다른 불순물에 의

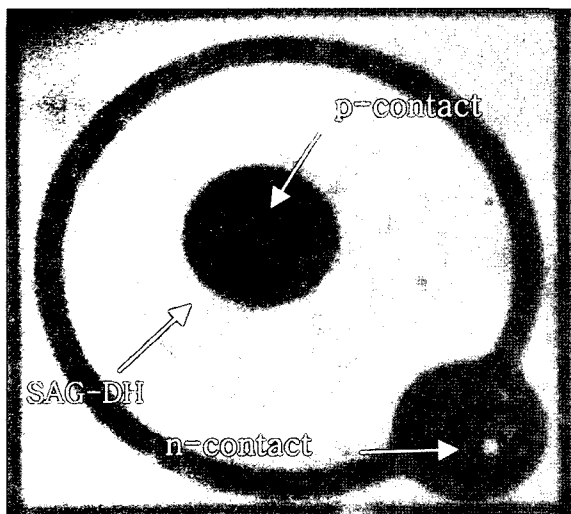


Fig. 4. Top-view image of the SAG-LED grown by the mixed-source HVPE with multi-sliding boat system.

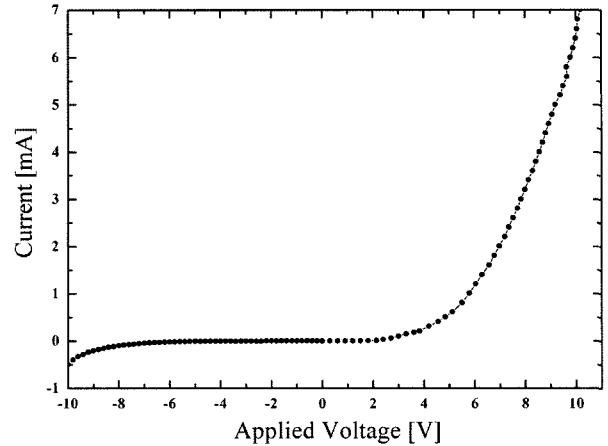


Fig. 5. Typical I-V characteristic.

해 고농도 도핑이 어려운 것으로 나타났으며 고농도의 n형 도핑을 위하여 Te과 같은 혼합소스 HVPE 방법에 적합한 물질을 연구하고 있다. P형 도핑의 경우는 Mg-doped GaN의 캐리어 농도를 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 으로 조절하였다.

SAG-LED의 top-view 사진은 Fig. 4에 나타내었다. LED 패턴의 chip 크기는 $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 이다. LED 패턴의 window 영역 지름은 $200 \mu\text{m}$ 이고 p-pad 전극의 지름은 $100 \mu\text{m}$ 이다. n 층의 전류 확산을 원활히 하기 위하여 원형 고리형태의 전극모양을 이용하였다.

SAG-InGaN/AlGaN LED의 I-V 특성은 Fig. 5에 나타내었다. 본 논문에서의 LED의 turn-on voltage는 약 4 V이고 저항은 250Ω 그리고 역방향 전압이 -5 V 일 때 약 0.1 mA의 전류손실이 측정되었다. 이 값들은 상용 LED에 비하여 좋지 않은 결과이지만 구조설계 및 공정조건 개선에 의하여 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

한편, 상온에서 주입 전류를 증가시키면서 EL을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. SAG-LED의

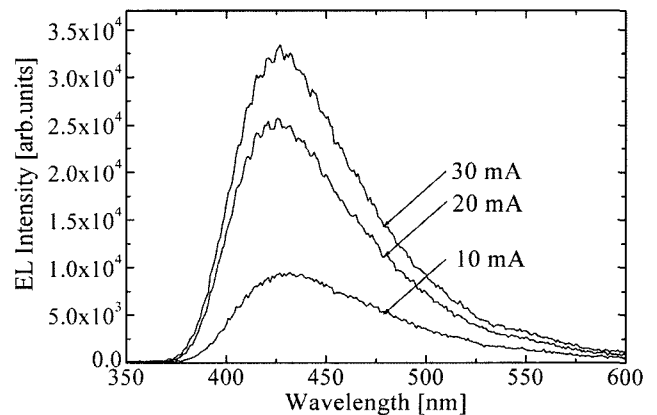


Fig. 6. The EL spectra of SAG-LED for the different forward currents.



Fig. 7. EL image of the SAG-LED.

중심파장은 주입 전류가 10 mA 일 때 430 nm, 20 mA 일 때 425 nm 그리고 30 mA 일 때 427 nm의 특성을 얻었다. 주입 전류가 증가함에 따라 약간의 blue shift가 발생되었다. 주입 전류가 증가함에 따라 중심파장이 blue shift되는 이유는 캐리어의 과도한 발생에 의한 band filling 현상과 polarization field 내의 competition mechanism, 그리고 carrier screening 등의 원인으로 볼 수 있다[11-13]. 중심파장이 425 nm 일 때의 반치폭 (FWHM : full width at half maximum)은 0.47 eV로서 성장조건 및 구조개선 등에 의해 좀 더 향상될 수 있으리라 기대된다. InGaN 활성층의 In 조성은 Vegard 법칙을 이용하여 계산하였다[14]. Bowing parameter는 1.43 eV로 하고 InGaN의 밴드갭은 0.7 eV로 계산한 결과 In의 조성비는 12%로 평가되었다.

Fig. 7에는 상온에서 주입전류가 20 mA 일 때 실제 발광되는 모습을 나타내었으며 발광 강도는 측정되지 않았으나 청색의 밝은 광을 관측 할 수 있었다.

4. 결 론

Multi-sliding boat를 이용한 새로운 혼합소스 HVPE 방법으로 SAG-InGaN/AlGaN LED 이중접합구조를 성장하였다. SAG-InGaN/AlGaN LED의 구조는 Si-AlGaN cladding 층, InGaN 활성층, Mg-AlGaN cladding 층 그리고 Mg-GaN capping 층으로 구성되었다. SAG-LED의 EL peak은 주입전류가 20 mA일 때 중심파장이 425 nm 근처에서 측정되었고 반치폭은 0.47 eV이다. Multi-sliding boat를 이용한 혼합소스 HVPE 방법으로 성장한 SAG-InGaN/AlGaN LED 이중접합구조의 전기적 특성은 일반적인 LED에 비하여 나쁘지만 LED 구조의 성장조건과 디자인의 최적화가 이루어진다면 개선된 성능의

LED 제작이 가능할 것으로 판단하며 향후 낮은 생산단가와 LED 제작에 응용이 가능할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, *The blue laser diode*, Springer, Berlin (1997).
- [2] Y.J. Yu, M.Y. Ryu, P.W. Yu, D.J. Kim and S.J. Park, "Optical investigation of InGaN/GaN quantum well structures with various barrier widths", *J. Korean Phys. Soc.* 28 (2001) 134.
- [3] H.M. Kim, J.S. Choi, J.E. Oh and T.K. Yoo, "Cathodoluminescence characterization of GaN thick films grown by using the HVPE method", *J. Korean Phys. Soc.* 37 (2000) 956.
- [4] J.H. Chen, Z.C. Feng, H.L. Tsai, J.R. Yang, P. Li, C. Wetzel, T. Detchprohm and J. Nelson, "Optical and structural properties of InGaN/GaN multiple quantum well structure grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Thin Solid Films* 498 (2005) 123.
- [5] L. Hirsch and A.S. Barrière, "Electrical characterization of InGaN/GaN light emitting diodes grown by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.* 94 (2003) 5014.
- [6] S. Sanorpim, J. Wu, K. Onabe and Y. Shiraki, "Effects of growth temperature in selective-area growth of cubic GaN on GaAs (100) by MOVPE", *J. Cryst. Growth* 237-239 (2002) 1124.
- [7] S. Bohyama, H. Miyake, K. Hiramatsu, Y. Tsuchida and T. Maeda, "Freestanding GaN substrate by advanced facet-controlled epitaxial lateral overgrowth technique with masking side facets", *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (2005) L24.
- [8] D. Marx, Z. Kawazu, T. Nakayama, Y. Mihashi, T. Takami, M. Nunoshita and T. Ozeki, "Selective area growth of GaN/AlN heterostructures", *J. Cryst. Growth* 189/190 (1998) 87.
- [9] A. Usui, H. Sunakawa, A. Sakai and A. Yamaguchi, "Thick GaN epitaxial growth with low dislocation density by hydride vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* 36 (1997) L899.
- [10] H.S. Ahn, K.H. Kim, M. Yang, J.Y. Yi, H.J. Lee, C.R. Cho, H.K. Cho, S.W. Kim, T. Narita, Y. Honda, M. Yamaguchi and N. Sawaki, "Growth of thick AlGaIn by mixed-source hydride vapor phase epitaxy", *Appl. Surf. Sci.* 243 (2005) 178.
- [11] S. Nakamura, "The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes", *Science* 281 (1998) 956.
- [12] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Runato, S. Fujita and S. Nakamura, "Role of self-formed InGaIn quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm", *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 981.
- [13] Y. Li, W. Fang, W. Liu, H. Liu, C. Mo, L. Wang and F. Jiang, "Study of polarization field in GaN-based blue LEDs on Si and sapphire substrate by electroluminescence", *J. Luminescence*. 2006 (0000).
- [14] K.P. O'Donnell, I. Fernandez-Torrente, P.R. Edwards and R.W. Martin, "The composition dependence of the $In_xGa_{1-x}N$ bandgap", *J. Cryst. Growth* 269 (2004) 100.