

論文2000-37SD-12-2

유기금속화학기상증착법을 이용한 청색 발광 InGaN/GaN MQWs의 성장에 관한 연구

(Growth of Blue Light Emitting InGaN/GaN MQWs by Metalorganic Chemical Vapor Deposition)

金東俊*, 文用泰*, 宋根萬*, 朴成柱*

(Dong-Joon Kim, Yong-Tae Moon, Keun-Man Song, and Seong-Ju Park)

요 약

저압 유기금속화학기상증착법을 이용하여 효율적인 청색 발광을 하는 InGaN/GaN multiple quantum wells(MQWs)을 성장시키고, InGaN/GaN MQWs의 광학적 및 계면 구조 특성을 고찰하였다. 보다 효율적인 청색 발광을 하는 InGaN/GaN MQWs을 성장시키기 위하여, MQWs의 성장온도 및 InGaN 우물층과 GaN 장벽층의 두께를 변화시켜 최적 조건을 확립하였다. 특히, GaN 장벽층의 두께 변화가 InGaN 우물층과 GaN 장벽층간 계면의 구조적 특성에 지대한 영향을 미침을 확인하였다. X-ray 회절분석결과와 고분해능의 투과전자현미경 사진 분석으로부터 MQW 구조의 InGaN 우물층과 GaN 장벽층간의 계면이 매우 급준함을 발견할 수 있었다. 또한, 상온 PL 스펙트럼에서 72.6meV의 매우 좁은 반치폭을 갖는 단일 피크가 463.5nm에서 확인되었다.

Abstract

We investigated the growth of InGaN/GaN multiple quantum wells (MQWs) structures which emit blue light. The samples were grown in a low pressure metalorganic chemical vapor deposition system. We examined InGaN/GaN MQWs by varying growth temperatures and thicknesses of InGaN well and GaN barrier layers in MQWs. Especially, the thickness of GaN barrier in InGaN/GaN MQWs was found to severely affect the interfacial abruptness between InGaN well and GaN barrier layers. The higher order satellite peaks in the high resolution x-ray diffraction spectra and the high resolution cross sectional transmission electron microscope image of MQW structures revealed that the interface between InGaN and GaN layers was very abrupt. Room-temperature photoluminescence spectra also showed a blue emission from InGaN/GaN MQWs at the wavelength of 463.5nm with a narrow full width at half maximum of 72.6meV.

* 正會員, 光州科學技術院 新素材工學科 및 광전재료연구센터

(Department of Materials Science & Engineering and Center for Optoelectronic Materials Research, Kwangju Institute of Science & Technology, Kwangju)

※ 본 연구는 과학기술부의 전력용 반도체 기술개발 사업(98-N5-01-01-A-08)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

接受日字: 2000年 1月24日, 수정완료일: 2000年 11月22日

I. 서 론

넓은 띠틈간격을 갖는 직접 천이형 III-V족 질화물 반도체는 breakdown field(1.5×10^6 V/cm)와 열전도도 (1.3 W/cm 2) 등이 우수함으로 인하여 반도체 재료 분야의 연구에 새로운 장을 열게 되었다^[1]. 최근 질화물 반도체의 광학적 특성에 관한 연구는 청색 발광다이오드와 레이저다이오드의 구현으로 인하여 급속히 확산되고 있는 추세이다^[2,3]. 특히, InGaN/GaN multiple

quantum wells(MQWs) 구조는 현재 대부분의 질화물 반도체를 이용한 발광다이오드와 레이저다이오드에서 빛을 발하는 활성층으로 사용되기 때문에 심화된 연구가 추진되고 있다. 청색을 발하는 활성층으로 사용하기 위해서는 InGaN의 In함량이 증가되어야 하는데, 유기금속화학기상증착법(MOCVD: metalorganic chemical vapor deposition)을 이용한 질화물 반도체의 성장에서 필요한 고온($\sim 1000^\circ\text{C}$)에서는 InN가 쉽게 분해되기 때문에 In의 함량을 증가시키는데 어려움이 대두된다. 그러나, In의 함량을 증가시키는 문제는 MOCVD 방법을 이용하여 상대적으로 낮은 온도인 800°C 에서 In과 Ga의 원료 가스의 비를 증가시키는 방법으로 Nakamura박사가 문제해결의 실마리를 제공하였다^[4]. 또한, 최근의 연구 결과는 MOCVD 방법에서 분위기 가스로 주로 사용되는 수소가 In의 조성 증가를 제한한다는 보고가 있었다^[5]. 이것은 이미 열역학적 계산에 의하여 수소가 InN의 분해를 유도한다는 발표를 뒷받침하는 증거이다^[6]. 고품위의 InGaN/GaN MQWs을 성장시키기 위한 방편으로 GaN 장벽층의 도우핑 효과 및 InGaN 우물층의 두께 변화에 대한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다^[7,8]. 그러나, GaN 장벽층의 두께 변화가 InGaN/GaN MQWs의 계면 특성에 미치는 영향에 대한 보고는 매우 적다.

본 논문에서는 청색을 발광하는 고품위의 InGaN 박막과 InGaN/GaN MQWs을 성장시키는 방법들을 성장온도, InGaN 우물층과 GaN 장벽층의 두께 변화 등의 측면에서 고찰하였다. 성장된 InGaN 박막 및 InGaN/GaN MQWs의 광학적 및 구조적 계면 특성 분석은 상온 Photoluminescence(PL) 측정과 고분해능의 x-ray 회절 측정법 그리고 고분해능의 투과전자현미경 분석을 통하여 수행되었다.

II. 실험

본 논문에 사용된 모든 시료는 MOCVD법을 이용하여 반응로 내의 압력 200 Torr 하에서 (0001) 사파이어 기판 위에 성장되었다. GaN 핵생성층을 성장시키기 이전에 $1030\text{--}1040^\circ\text{C}$ 의 고온에서 수소가스만을 반응로 내로 유입하면서 사파이어 기판 위에 존재하는 이물질들을 제거하였다. GaN 핵생성층은 trimethylgallium(TMGa)과 고순도의 암모니아 가스를 원료 가스로 사용하여 505°C 에서 30nm의 두께로 성장시

켰다. 이어서, TMGa의 공급을 중단하고, 기판의 온도를 $1010\text{--}1020^\circ\text{C}$ 로 올린 후 $1.4\text{--}2.4\mu\text{m}$ 의 두께로 undoped GaN 박막을 증착시켰다. InGaN 박막은 온도를 $730\text{--}780^\circ\text{C}$ 로 변화시키며 undoped GaN 박막 위에 $0.1\mu\text{m}$ 의 두께로 성장되었다. In, Ga 및 N의 전구체로는 각각 trimethylindium(TMIn), TMGa 및 고순도의 암모니아를 사용하였고, 특히 포토루미네스스의 발광 피크 세기를 증폭시키기 위하여 5sccm의 SiH_4 가스를 성장 중에 첨가하였다^[9]. InGaN/GaN MQWs은 도우핑되지 않은 InGaN 우물층과 GaN 장벽층을 이용하여 undoped GaN위에 InGaN 박막을 성장시킨 것과 같은 방법으로 3-10 주기를 증착하였다. 모든 성장과정 중에 TMGa와 TMIn의 운반가스로는 수소를 사용하였다. 성장기 내의 분위기 가스의 경우는 undoped GaN 성장을 위해서는 수소를 이용하였으나, InGaN 박막이나 InGaN/GaN MQWs의 경우에는 In의 함량을 증가시키기 위한 목적으로 질소를 사용하였다^[5].

성장된 undoped GaN와 InGaN 박막의 두께는 주사전자현미경의 단면 사진 분석을 통하여 측정하였으며, 실시간 반사율 측정장비를 사용하여 전체 성장 과정을 모니터링하였다^[10]. 실시간 반사율 측정법은 텅스텐 백색광을 기판에 수직으로 조사한 후, 700nm의 파장을 갖는 반사된 빛의 세기를 시간에 따라 검출하여 반응로 내의 박막이 성장되는 과정을 실시간으로 모니터링하는 방법이다. InGaN/GaN MQWs의 두께는 고분해능의 x-ray 회절 측정을 통하여 얻어진 위상 피크간의 각도 간격을 이용하여 계산하였다. 상온 PL 측정은 325nm의 여기광을 갖는 He-Cd 레이저를 사용하여 시편을 여기시킨 후, PL을 double grating monochromator와 GaAs photomultiplier tube를 사용하여 기록하였다.

III. 결과 및 토의

고품위의 청색 발광 InGaN/GaN MQWs의 성장에 앞서, 청색 빛을 발하는 InGaN 우물층의 성장 조건을 확립하기 위하여 InGaN 박막 성장 조건을 조사하였다. InGaN 박막 성장이 수소 분위기 하에서 행하여졌을 시에는 성장온도를 700°C 까지 낮추었음에도 불구하고 In의 조성이 약 16%로 제한되었다. 이는 상온 PL 측정에서 파장 409nm의 자색빛에 해당된다. 따라서,

본 연구에서는 모든 InGaN 박막 및 InGaN/GaN MQWs의 성장 시에 성장기 내에 질소 분위기를 유지하여 In 함량 증가를 도모하였다. 그림 1은 1.2 μ m 두께의 undoped GaN 위에 TMGa/TMIn의 비율 대략 1로 일정하게 유지한채 성장온도만을 변화시키며 성장된 0.1 μ m 두께의 InGaN 박막의 상온 PL 스펙트럼을 나타낸다. 성장온도를 775 $^{\circ}$ C에서 745 $^{\circ}$ C로 낮춤에 따라서 PL 피크의 위치가 장파장쪽으로 이동하는 것이 관측되었는데, 이는 저온에서 In의 박막내로의 혼입효율이 증가되기 때문이다. 반면에 각각의 PL 피크의 반치폭은 In 조성 증가에 의한 결정성의 저하로 인하여 성장온도가 낮아짐에 따라서 넓어지는 경향을 보였다. 주목할 만한 점은 성장온도가 755 $^{\circ}$ C 이하에서 PL 피크의 위치가 급격히 장파장쪽으로 이동하는 것이 관측되었는데, 이것은 InGaN 박막에서의 In의 composition fluctuation에 기인한 In-rich 상의 생성 때문으로 생각된다^[11]. Ho 등^[12]에 의하면, 삼원계인 InGaN에서는 GaN와 InN의 큰 격자상수 차이에 기인한 solid phase immiscibility에 의해 상 분리 현상이 발생할 수 있다고 보고하고 있다. 그림 1의 결과로부터, In의 composition fluctuation은 임계 In 조성을 지나서 시작되는 것으로 판단된다.

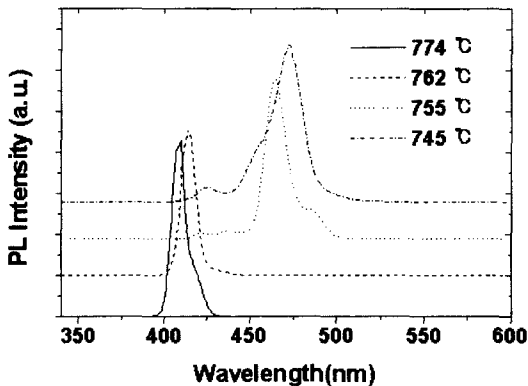


그림 1. 다양한 온도에서 성장된 0.1 μ m 두께의 InGaN 층들에서 얻어진 상온 PL 스펙트럼
 Fig. 1. Room-temperature photoluminescence spectra of 0.1 μ m thick InGaN layers grown at various growth temperatures.

본 연구에서는 InGaN 박막의 두께 변화 실험에서 InGaN 박막의 두께가 얇아지면서 In의 혼입이 억제 되는 것으로 드러났다. Shimizu 등^[13] 역시 InGaN의 두께가 증가함에 따라서 In의 조성이 증가하는 것을

보고한 적이 있다. 그러므로, InGaN/GaN MQWs 성장 시에는 TMIn/TMGa의 비율 3으로 증가시켰다. InGaN/GaN MQWs은 1.2 μ m 두께의 undoped GaN 위에 740, 760, 780 $^{\circ}$ C에서 5주기로 성장시켰다. 그림 2에서 보여지듯이, InGaN/GaN MQWs에서 나오는 PL 피크의 위치는 성장온도가 감소함에 따라 장파장 쪽으로 이동하였다. 그러나, PL의 세기는 성장온도가 높은 경우에 결정성의 향상으로 인하여 강하게 나타났다. InGaN/GaN MQWs에서 청색 발광을 얻기 위

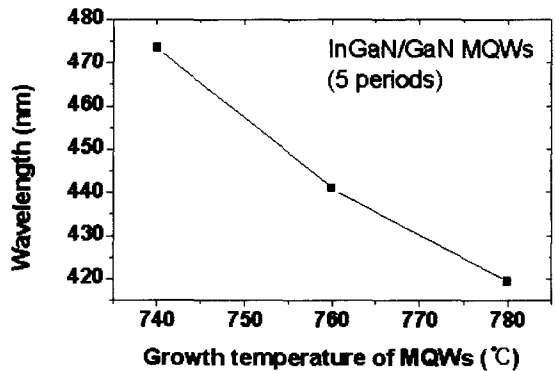


그림 2. 성장온도 변화에 따른 InGaN/GaN MQWs의 상온 PL 스펙트럼의 피크 위치 변화
 Fig. 2. The peak shift in the room-temperature photoluminescence of InGaN/GaN MQWs as a function of growth temperature of MQWs.

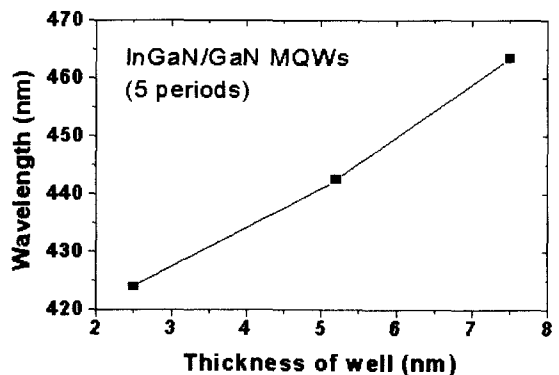


그림 3. InGaN 우물층의 두께 변화에 따른 InGaN/GaN MQWs의 상온 PL 스펙트럼의 피크 위치 변화
 Fig. 3. The shift of emission peak in the photoluminescence spectra of InGaN/GaN MQWs measured at room-temperature as a function of the thickness of InGaN well layer.

하여, 성장온도를 760°C로 하고 다른 조건은 일정하게 유지하면서 InGaN 우물층의 두께 변화를 시도하였다. 그림 3은 5주기의 InGaN/GaN MQWs에서 발하는 상온 PL 피크의 위치가 InGaN 우물층의 두께가 감소하면서 단파장 방향으로 이동하는 것을 나타낸다. PL 피크의 단파장 방향으로의 이동은 InGaN 우물층의 두께가 작아지면서 발생하는 양자구속효과에 의한 것이거나 또는, InGaN 우물층의 두께 변화에 의한 잔류 응력의 변화로 야기된 In의 composition fluctuation으로 설명되어 질 수 있다^[8]. 7.6nm 두께의 InGaN 우물층을 사용한 InGaN/GaN MQWs에서 파장이 463.5nm에 해당하는 청색 PL이 관찰되었다.

GaN 장벽층의 두께 변화가 InGaN/GaN MQWs의 계면 특성에 미치는 효과를 연구하기 위하여, InGaN 우물층의 두께를 7.6nm로 일정하게 하고 GaN 장벽층의 두께만을 변화시키는 실험을 수행하였다. 그림 4는 InGaN/GaN MQWs의 계면 특성에 미치는 GaN 장벽층의 두께 변화 효과를 조사하기 위하여 이루어진 x-ray 회절법 측정 결과이다. 그림 4에서 $2\theta = 34.56^\circ$ 에 해당하는 피크는 InGaN/GaN MQWs의 아래쪽에 위치한 undoped GaN에서 회절되어 나온 것이고, 0th, 1st, 2nd 위성 피크들은 InGaN/GaN MQWs에서 얻어진 x-ray 피크들이다. 그림 4의 0th와 1st 위성 피크간의 각도 간격으로부터 한 쌍의 InGaN/GaN의 두께를 계산해 낼 수 있었다. GaN 장벽의 두께가 10.4nm인 InGaN/GaN

MQWs의 경우 잘 구분되어진 위성 피크가 관측되는 것으로부터 우물층과 장벽층 사이의 계면이 뚜렷이 구분되어 성장되었음을 알 수 있다^[14]. 그러나, 장벽층의 두께를 그 이상으로 증가시키에 따라서 계면이 뚜렷하지 못하고 상호 확산된 것 같은 형태의 x-ray회절 피크가 나타남을 관측할 수 있었다. 이러한 결과는 상대적으로 저온이며 질소 분위기 속에서 성장된 GaN 장벽층의 결정성이 저하되는 것에서 부분적으로 이유를 찾을 수 있다. 실제로 InGaN/GaN MQWs 위에 1000°C 이상의 고온에서 GaN를 성장시켰을 경우, 수소 분위기에서 성장시켰을 때와는 다르게 질소 분위기에서 성장된 경우 GaN에서 잘 알려진 결정결합과 관련된 노란색 발광이 두드러지는 것으로 보아 저온에서 질소 분위기 하에서 성장된 GaN의 경우 결정성의 저하가 심할 것임을 예상할 수 있었다.

InGaN/GaN MQWs 구조의 결정성에 대한 연구를 하기 위하여, 0th 위성 피크에 대하여 x-ray 로킹 측정을 수행하였다. 0th 위성 피크의 x-ray 로킹 측정 곡선의 반치폭 값은 그림 5에서 보여지듯이 GaN 장벽층의 두께가 증가하면서 넓어짐을 보였다. 로킹 곡선의 반치폭이 증가한다는 것은 InGaN/GaN MQWs의 결정성이 나빠짐을 의미하고, 바로 이러한 결정성의 저하가 InGaN/GaN 계면의 특성을 저하시켰다고 사료된다.

그림 6은 5주기의 InGaN/GaN MQWs에서 관측된 투과전자현미경의 단면 사진이다. 투과전자현미경

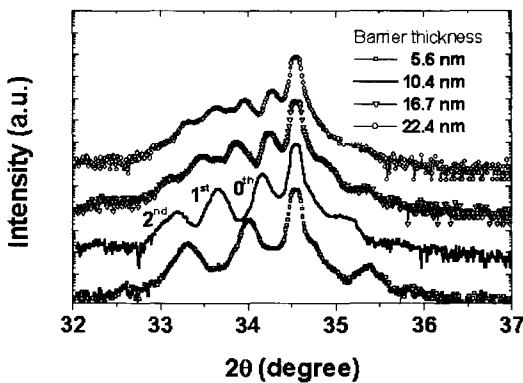


그림 4. 여러 가지 두께 변화를 갖는 GaN 장벽층과 함께 성장된 InGaN/GaN MQWs의 x-ray $\theta - 2\theta$ 회절 스펙트럼

Fig. 4. X-ray $\theta - 2\theta$ diffraction measurements of InGaN/GaN MQWs having different GaN barrier thicknesses.

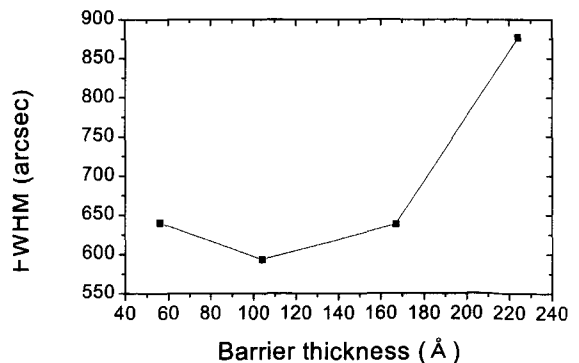


그림 5. GaN 장벽층의 두께 변화에 따른 InGaN/GaN MQWs의 0th 위성 피크의 x-ray 로킹 곡선 반치폭 변화

Fig. 5. Full width at half maximum of the 0th order satellite peak in an x-ray θ -rocking curve of InGaN/GaN MQW with different GaN barrier thicknesses.

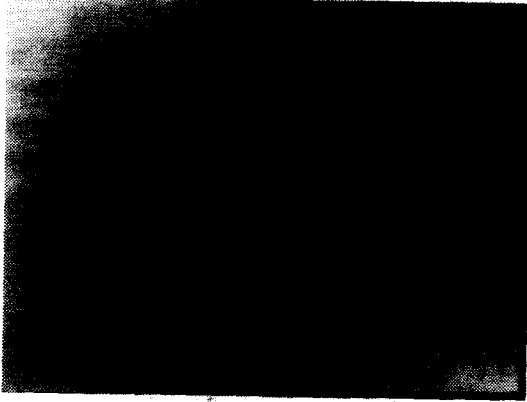


그림 6. 5주기의 InGaN/GaN MQWs의 투과전자현미경 단면 사진

Fig. 6. A cross sectional transmission electron microscope image of InGaN/GaN MQWs (5 periods).

분석을 위한 시료는 77K에서의 Ar 이온 밀링을 통하여 만들어졌다. 투과전자현미경 분석은 JEM 2010 모델을 사용하여 수행되었으며, 200kV의 동작 전압에서 InGaN/GaN MQWs 시료를 조사하였다. InGaN/GaN MQWs의 투과전자현미경 단면 사진은 우물층과 장벽층간의 계면이 뚜렷이 구분됨을 보여준다.

그림 7은 최적화된 7주기의 InGaN/GaN MQWs의 x-ray θ - 2θ 회절 스펙트럼을 나타낸다. 상기의 시료는 760°C에서 성장되었다. 그림에서 나타나듯, 최적화된 MQW구조의 경우 3rd 위성 피크까지 관측되고 있는데, 이것은 MQW구조에서 우물층과 장벽층간의 계면이 대단히 분명하게 구분되어짐을 나타낸다. 최적화된 7주기의 InGaN/GaN MQWs 시료에 대한 상온 PL 측정 결과 463.5nm에서 72.6meV의 매우 좁은 반치폭을 갖는 단일 피크를 관측할 수 있었다(그림 8). 최근에 InGaN/GaN MQWs 구조에서 InGaN/GaN 주기를 증가시킴에 따라 PL 피크가 장파장 쪽으로 이동한다는 보고가 있었다. 질화물 반도체의 경우 압전상수 값이 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 상기의 현상은 큰 압전 상수 값에 의한 quantum confined Stark effect가 완화되어 나타나는 것으로 설명되어진다^[15]. 하지만 본 논문에서 연구된 시료의 경우에 있어서는 InGaN/GaN 주기의 개수가 증가하면서 발광층의 부피가 증가하기 때문으로 보이는 PL 세기의 증가는 있었지만, 피크의 위치가 변화되는 것은 발견하지 못하였다. 이 부분에 관한 보다 자세한 연구는 현재 진행 중에 있다.

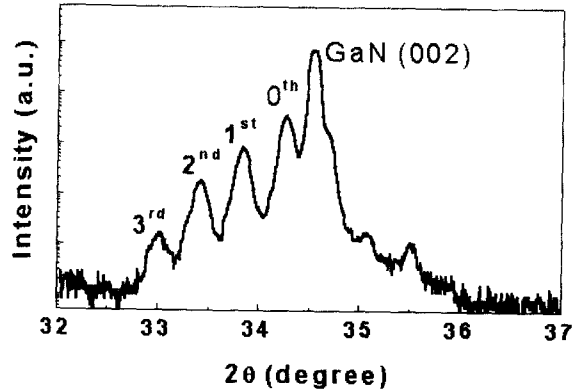


그림 7. 760°C에서 성장시킨 최적화된 7주기의 InGaN/GaN MQWs의 x-ray θ - 2θ 회절 스펙트럼

Fig. 7. X-ray θ - 2θ diffraction measurement of InGaN/GaN MQWs (7 periods) grown at 760°C.

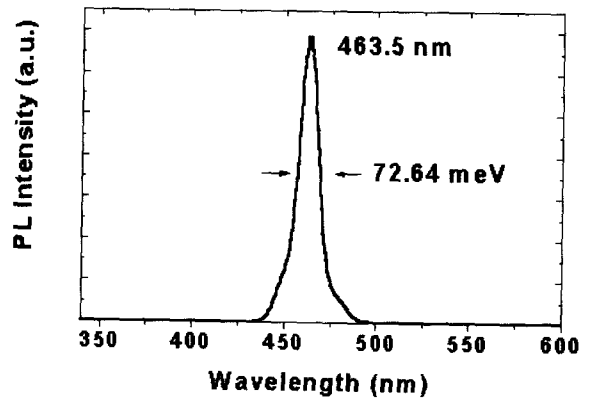


그림 8. 최적화된 7주기의 InGaN/GaN MQWs에서 관측된 상온 PL 스펙트럼

Fig. 8. Room-temperature photoluminescence spectrum from the optimized InGaN/GaN MQWs(7 periods) grown at 760°C showing a very intense and narrow photoluminescence peak.

IV. 결 론

청색 발광을 하는 고품위의 InGaN 및 InGaN/GaN MQWs을 저압 MOCVD법을 이용하여 성장하였다. 성장온도가 감소함에 따른, InGaN 박막의 큰 PL 피크의 장파장으로의 이동은 In의 composition fluctuation 현상 때문으로 해석되었다. 또한, GaN 장벽층의 두께 변화는 InGaN/GaN MQWs의 계면 특성에 커다란 영향을 미침이 판명되었는데, 최적화된

GaN 장벽층의 조건에서 성장된 InGaN/GaN MQWs의 경우 463.5nm의 청색 스펙트럼에서 72.6meV의 매우 좁은 반치폭을 갖는 상온 PL을 관측할 수 있었다. X-ray 회절 측정법과 투과전자현미경을 이용한 단면 조사에서도 InGaN 우물층과 GaN 장벽층 간의 계면이 매우 급준함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C. Yuan, T. Salagaj, A. Gurary, A. G. Thompson, W. Kroll, R. A. Stall, C. -Y. Hwang, M. Schurman, Y. Li, W. E. Mayo, Y. Lu, S. Krishnankutty, I. K. Shmagin, R. M. Kolbas and S. J. Pearton, "Investigation of n- and p-type doping of GaN during epitaxial growth in a mass production scale multiwafer-rotating-disk reactor.", *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B13, no. 5, pp. 2075-2080, 1995.
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama, "High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 7A, pp. L797-L799, 1995.
- [3] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto, "InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes." *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 1B, pp. L74-L76, 1996.
- [4] S. Nakamura and T. Mukai, "High-quality InGaN films grown on GaN films.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, no. 10B, pp. L1457-L1459, 1992.
- [5] E. L. Piner, M. K. Behbehani, N. A. El-Masry, F. G. McIntosh, J. C. Roberts, K. S. Boutros and S. M. Bedair, "Effect of hydrogen on the indium incorporation in InGaN epitaxial films.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 4, pp. 461-463, 1997.
- [6] A. Koukitu, N. Takahashi, T. Taki and H. Seki, "Thermodynamic analysis of the MOVPE growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.", *J. Crystal Growth*, vol. 170, pp. 306-311, 1997.
- [7] Y. H. Cho, J. J. Song, S. Keller, M. S. Minsky, E. Hu, U. K. Mishra and S. P. DenBaars, "Influence of Si doping on characteristics of InGaN/GaN multiple quantum wells.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 8, pp. 1128-1130, 1998.
- [8] C. J. Sun, M. Z. Anwar, Q. Chen, J. W. Yang, M. A. Khan, M. S. Shur, A. D. Bykhovski, Z. Liliental-Weber, C. Kisielowski, M. Smith, J. Y. Lin and X. Xiang, "Quantum shift of band-edge stimulated emission in InGaN-GaN multiple quantum well light-emitting diodes.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 22, pp. 2978-2980, 1997.
- [9] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, "Si-doped InGaN films grown on GaN films.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 1A/B, pp. L16-L19, 1993.
- [10] D. J. Kim, Y. T. Moon, K. S. Ahn and S. J. Park, "In-situ normal incidence reflectance study on the effect of growth rate of nucleation layer on GaN by metalorganic chemical vapor deposition.", to be printed in *J. Vac. Sci. Technol. B*.
- [11] F. Scholz, A. Sohmer, J. Off, V. Syganow, A. Dören, J. S. Im, A. Hangleiter and H. Lakner, "Incorporation efficiency and composition fluctuations in MOVPE grown GaInN/GaN hetero structures and quantum wells.", *Mat. Sci. Eng.*, vol. B50, pp. 238-244, 1997.
- [12] I. H. Ho and G. B. Stringfellow, "Solid phase immiscibility in GaInN.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 18, pp. 2701-2703, 1996.
- [13] M. Shimizu, Y. Kawaguchi, K. Hiramatsu and N. Sawaki, "MOVPE growth of thick homogeneous InGaN directly on sapphire substrate using AlN buffer layer.", *Solid State Electron.*, vol. 41, no. 2, pp. 145-147,

1997.

[14] J. Nishio, L. Sugiura, H. Fujimoto, Y. Kokubun and K. Itaya, "Characterization of InGaN multi-quantum well structures for blue semiconductor laser diodes.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 25, pp. 3431-3433, 1997.

[15] T. Wang, D. Nakagawa, J. Wang, T. Sugahara and S. Sakai, "Photoluminescence investigation of InGaN/GaN single quantum well and multiple quantum wells.", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 24, pp. 3571-3573, 1998.

저 자 소개



金 東 俊(正會員)

1973년 5월 23일생. 1996년 한양대학교 금속재료공학과 졸업. 1998년 광주과학기술원 신소재공학과 졸업(석사). 1998년~현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정

재학중



文 用 泰(正會員)

1970년 8월 3일생. 1997년 한양대학교 금속공학과 졸업. 1999년 광주과학기술원 신소재공학과 졸업(석사). 1999년~현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학

중



宋 根 萬(正會員)

1974년 11월 3일생. 1998년 성균관대학교 금속공학과 졸업. 2000년 광주과학기술원 신소재공학과 졸업(석사). 2000년~현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학

중



朴 成 柱(正會員)

1952년 11월 1일생. 1976년 서울대 화학과 졸업. 1979년 서울대 화학과 석사. 1985년 Cornell 대학교 이학박사. 1985년~1987년 IBM T. J. Watson 연구소 연구원.

1987년~한국전자통신연구원 반도체기술연구단/기초기술연구부 선임/책임연구원. 1995년~현재 광주과학기술원 신소재공학과 교수