

論文98-35D-8-3

청색발광소자를 위한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  결정성장 및 특성평가(Growth and Characterization of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  Epitaxial Layer for Blue Light Emitter)李昔憲\*, 李宰承\*, 許增秀\*\*, 李炯圭\*\*\*, 李承夏\*,  
咸成鎬\*\*\*\*, 李龍鉉\*, 李正熙\*(Suk-Hun Lee, Jae-Seung Lee, Jeung-Soo Huh, Hyung-Gyoo Lee,  
Seung-Ha Lee, Sung-Ho Hahm, Yong-Hyun Lee, and Jung-Hee Lee)

## 요 약

청색발광소자에 응용하기 위한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정 박막을 (0001) 사파이어 기판위에 MOCVD방법으로 성장하였다. AFM (Atomic Force Microscopy) 및 RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) 및 DC-XRD (Double Crystal X-Ray Diffraction)를 통해 700°C 이상에서 성장된  $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}/\text{GaN}$  이중접합 구조의 결정막은 양질의 결정성을 갖는 것을 확인하였다. 또한 청색 파장대의 발광을 위해서 800°C에서 Si과 Zn를 동시에 도핑하여 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막에 대한 상온 PL 측정 결과는 donor-to-acceptor pair 천이에 의한 꼭지점이 460~470 nm에서 일어나고,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  막의 band-edge 꼭지점은 425 nm에서 발생함을 보여주었다. 그리고 undoped MQW  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  막에 대한 저온 PL 측정 결과, GaN barrier의 exciton과 DA pair에 있던 carrier들이 well 영역으로 유입되어 강한 MQW 꼭지점이 발생하는 것을 확인하였다.

## Abstract

Single crystalline  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  thin film was grown by MOCVD on (0001) sapphire substrate for the blue light emitting devices. A good quality of  $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructure grown above 700°C was confirmed by various characterization techniques of AFM, RHEED and DC-XRD. Through PL measurement at room temperature for the Si-Zn co-doped  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  structure grown at 800°C to obtain blue wavelength emission, 460-470 nm and 425 nm emission peak were observed, which are believed to be from donor-to-acceptor pair transition and band edge emission of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , respectively. The result of PL measurement of the undoped MQW  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layer at low temperature confirmed that the strong MQW peak was resulted by exciton from the GaN barrier and carrier of DA pair confined into the well layer.

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(Kyungpook National University School of Electrical and Electronic Engineering)

\*\* 正會員, 慶北大學校 金屬工學科

(Kyungpook National University, Department of Metallurgical Engineering)

\*\*\* 正會員, 忠北大學校 電氣電子工學部

(Chungpook National University school of Electrical and Electronic Engineering)

\*\*\*\* 正會員, 慶北大學校 센서 技術研究所

(Kyungpook National University, Sensor Technology Research Center)

接受日字:1998年6月18日, 수정완료일:1998年7月27日

## I. 서론

III-V질화물 반도체를 이용한 광소자의 제작에 있어 가시광 파장대의 빛을 방출하기 위해서는  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (1.9~3.4 eV)와  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (3.4 eV~6.2 eV)의 삼원소질화화합물의 단결정 박막의 성장제어가 필수적이다.<sup>[1]</sup> 삼원소질화화합물을 성장할 경우, TMGa, TMIIn, TMAI,  $\text{NH}_3$  등의 반응가스의 결합에너지가 다르므로 성장온도와 유량이 그 조성비의 조절에 중요 변수로 작용한다. 높은 성장온도에서 상온으로 냉각시에 사파이어 기판과의 열팽창계수 차이에 의한 여러 가지 스트레스를 받아 성장된 단결정의 에너지갭과 PL 측정시의 최대 파장이 일치하지 않는 경우가 발생한다. 특히  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정 박막은 indium의 분압이 매우 높아서 GaN의 성장과 같은 고온에서 성장할 경우, 높은 분압에 의해서 indium이 해리(dissociation)가 되어 원하는 파장의 빛을 방출하는 적절한 indium 조성비를 얻을 수 없게 된다.<sup>[2]</sup> 또한 저온성장시에는 해리가 적게 되어 indium 조성비를 증가시킬 수 있지만 양질의 단결정 박막을 얻을 수 없게 된다. 그러므로 단결정 특성이 보장되면서 indium 조성비의 제어범위를 높일 수 있는 최적의 성장온도를 조절하는 것이 매우 중요하다.<sup>[3~5]</sup>

본 연구에서는 EMCORE D-125 MOCVD를 이용하여 결정 성장 온도 및 TMGa, TMIIn 유량을 변화시켜 가면서 bulk 및 MQW 그리고 Si-Zn codoped 등 세가지 구조의  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  결정막을 성장시켜 결정성 및 indium composition의 변화에 따른 청색 파장대의 발광특성에 관해 연구하였다. 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  결정층에 대한 표면 상태와 거칠기는 SEM(Scanning Electron Microscopy)과 AFM(Atomic Force Microscopy)으로 조사하였고, 파장의 이동에 따른 변화는 He-Cd 레이저를 이용하여 PL 측정을 수행하였다. 그리고 RHEED(Reflection High Energy Electron Diffraction)과 Triple-axis XRD(X-ray Diffraction)을 이용하여 그 결정성을 평가하여 청색발광 LED 소자에의 응용 가능성을 조사하였다.

## II. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 단결정 박막의 성장

본 연구에서 사용된 EMCORE MOCVD는 carrier

및 dopant gas의 유량(flow rate)을 수직으로 전달할 수 있게 된 형태이다. 기판으로 2 inch (0001) 사파이어를 사용하였고 사파이어 기판의 표면 상태가 결정 성장에 큰 영향을 미치므로 메탄올과 아세톤 그리고 TCE 용액에 순서대로 각각 1분동안 흔들어서 세척하고 다시 TCE 및 아세톤 그리고 메탄올 용액에 각각 2회씩 5분 동안 초음파 (ultrasonic) 세척을 한 다음 탈이온수로 10 분 동안 세척하였다. 그리고 80°C, 부피비 3:1의 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )과 인산( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 혼합용액에서 5 분동안 세척한 다음 탈이온수로 20분 동안 세척한 후 수분을 완전히 제거하였다.

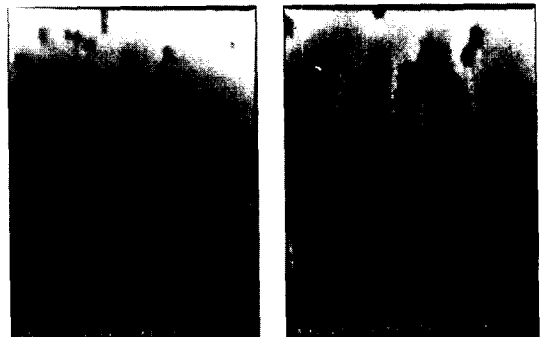
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정막을 성장시키기 전에 undoped GaN 단결정 박막을 성장시켰다. 성장된 undoped GaN은 TMGa의 유량 및  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  유량비는 각각 100  $\mu\text{mole}$ 과 7.3/7.2 slpm으로 하여 20분 동안 약 0.78  $\mu\text{m}$  정도의 두께로 성장하였다. 성장된 undoped GaN 단결정막의 표면은 거울면 같았으며  $10^{16}/\text{cm}^3$  대의 매우 낮은 background doping 농도를 갖는 것으로 조사되었다. 구체적인 성장조건은 표 1에 나타내었다.

## III. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 결정성장 및 특성평가

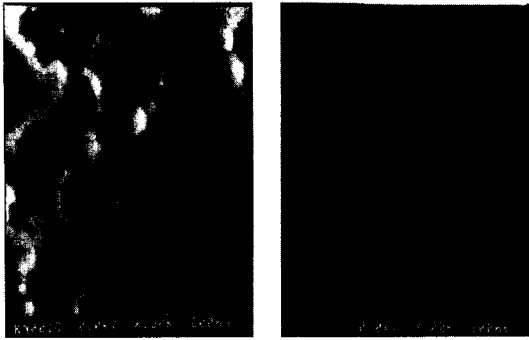
### 1. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 결정박막

#### 1) SEM(scanning electron microscopy) 측정

그림 1은 TMGa와 TMIIn 유량비를 10/10  $\mu\text{mole}$ 로 고정시키고 성장온도를 변화시켰을 때, 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막에 대한 SEM 표면사진을 나타낸 것이다. 그림 1(d)를 제외하고는 성장된 시편의 두께가 약 0.1 $\mu\text{m}$  였다.



(a)  $T_G : 740^\circ\text{C}$ , thickness : 0.1  $\mu\text{m}$  (b)  $T_G : 720^\circ\text{C}$ , thickness : 0.1  $\mu\text{m}$



(a)  $T_G : 680^\circ\text{C}$ , thickness :  $0.1 \mu\text{m}$  (b)  $T_G : 680^\circ\text{C}$ , thickness :  $500 \text{ \AA}$   
 그림 1. 성장온도의 변화에 따른  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막의 표면 SEM 사진  
 Fig. 1. Surface of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  thin film by SEM image depending on the variation of growth temperature.

그림에서도 알 수 있듯이 성장온도가 감소할수록 TMIn으로부터 indium의 분해(decomposition) 확률이 낮아지고 이에 따라 표면에 indium droplet 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상으로 성장온도가 감소하면 indium 분해는 증가하지만 결정성은 나빠지게 된다. 그러나 저온의 결정성장이라 할지라도 성장되는  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막의 두께가 얇을 경우 이러한 영향은 그림 1(d)와 같이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다.

2) PL (photoluminescence) 분석

그림 2는 성장온도를 변화시켜 성장한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막에 대하여 상온에서  $\text{N}_2$  pulse 레이저를 이용하여 측정한 PL spectrum이다. 성장온도가 감소할수록 표면에 indium droplet이 증가하는 SEM 결과와 비교할 때 emission peak은 red shift되지만 FWHM이 점점 증가하는 것으로 보아 indium의 조성이 증가하지만 결정성은 indium droplet의 영향으로 저하됨을 확인할 수 있다. 이때 FWHM은 상대적으로 증가하였고 같은 TMGa/TMIn 유량일지라도 indium 조성비는 성장온도에 따라 최대 15% 까지 증가하였다.

그림 3은  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막의 성장온도를  $680^\circ\text{C}$ 로 하여 약  $500 \text{ \AA}$ 의 두께, TMGa의 유량을  $10 \mu\text{mole}$ 으로 고정시킨 후 TMIn 유량만을 10, 15, 20  $\mu\text{mole}$ 으로 변화시켜 성장된 시편에 대한 PL 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 위의 TMIn 유량이 증가될수록 indium 조성이 증가되어 각각 18 %에서 19.6 %로 증가하였다. 그러나 TMIn

의 유량증가에 따른 박막의 indium 조성비는 포화되는 경향을 보이고 있다. 향후 압력, 온도에 따른 indium 조성에 관하여 좀더 면밀한 검토가 요구된다.

표 1.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정 박막의 성장조건  
 Table 1. Growth conditions of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  single-crystal film.

No.	Step	Substrate Temp.( $^\circ\text{C}$ )	Deposited material	Layer thickness
1	$\text{H}_2$ cleaning	1030		
2	GaN buffer	500	GaN	300 $\text{ \AA}$
3	Undoped GaN	1020	GaN	1 $\mu\text{m}$
4	Bulk, Si-Zn co-doped, undoped MQW $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	670~800	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	200 $\text{ \AA}$ ~0.1 $\mu\text{m}$

Undoped GaN epilayer	
Carrier gas	Flow rate
$\text{NH}_3$ (slpm)	7.2
$\text{H}_2$ (slpm)	7.3
TMGa flow ( $\mu\text{mole}/\text{min}$ )	100

Bulk, Si-Zn co-doped, undoped MQW $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ growth			
Carrier gas	Flow rate		
$\text{NH}_3$ (slpm)	7.3		
$\text{N}_2$ (slpm)	4.0		
TMIn flow ( $\mu\text{mole}/\text{min}$ )	Si doped Bulk	10, 15, 20, 25	
	Si-Zn co-doped	30	
	Undoped MQW	well: 30 barrier: 5	
TMGa flow ( $\mu\text{mole}/\text{min}$ )	Si doped Bulk	10	
	Si-Zn co-doped	10	
	Undoped MQW	well: 10 barrier: 10	
TMZn flow ( $\mu\text{mole}/\text{min}$ )	6.7, 10		
$\text{SiH}_4$ flow (sccm)	Si doped Bulk	2.5	
	Si-Zn co-doped	2.5	
Growth temp.( $^\circ\text{C}$ )	Si doped Bulk	670, 680, 710, 720, 740	
	Si-Zn co-doped	800	
	Undoped MQW	800	
Thickness	Si doped Bulk	0.1 $\mu\text{m}$ , 500 $\text{ \AA}$	
	Si-Zn co-doped	~ 200 $\text{ \AA}$	
	Undoped MQW	well	50 $\text{ \AA}$
		barrier	50 $\text{ \AA}$

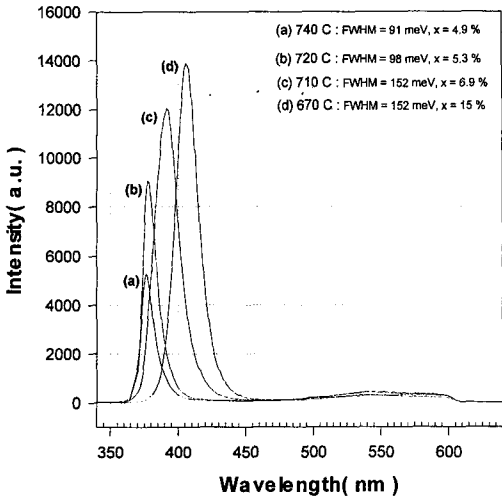


그림 2. 성장온도의 변화에 따른  $In_xGa_{1-x}N$ 의 PL 스펙트럼

Fig. 2. PL spectrums of  $In_xGa_{1-x}N$  depending on the growth temperatures.

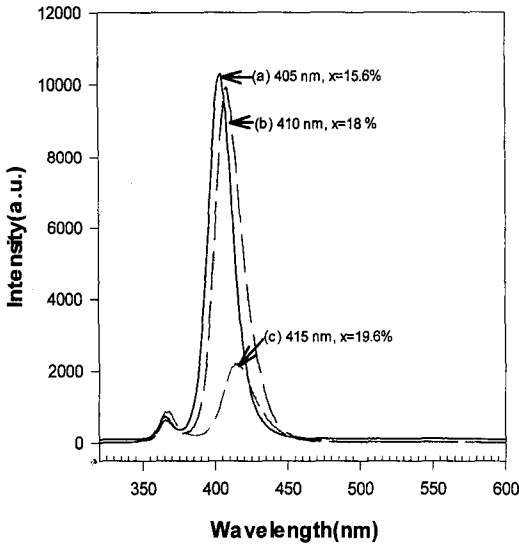


그림 3. TMIn 유량에 따른  $In_xGa_{1-x}N$ 의 PL 스펙트럼

Fig. 3. PL spectrums of  $In_xGa_{1-x}N$  depending on the TMIn flow rate.

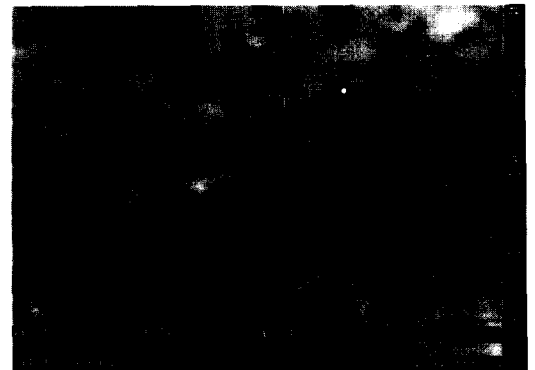
3) AFM (atomic force microscopy) 분석

AFM을 이용하여 성장온도의 변화에 따른  $In_xGa_{1-x}N$  박막의 표면 거칠기를 관찰하고, 성장온도가  $In_xGa_{1-x}N$  결정 성장에 미치는 영향 및 성장구조에 대하여 고찰하였다. 분석에 사용된  $In_xGa_{1-x}N$  시편의 성장조건은 성장온도가 720°C와 670°C, 두께는 0.1  $\mu m$ ,

TMGa와 TMIn 유량비는 10/10  $\mu mole$  이었다. 720°C 온도에서 성장시킬 경우, 성장된 시편 표면이 평탄한  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막을 얻을 수 있다. 670°C로 온도를 감소시켰을 때, 성장 박막의 표면은 그에 비례하여 3차원적인 결정성장이 되어 표면이 거칠어졌다.



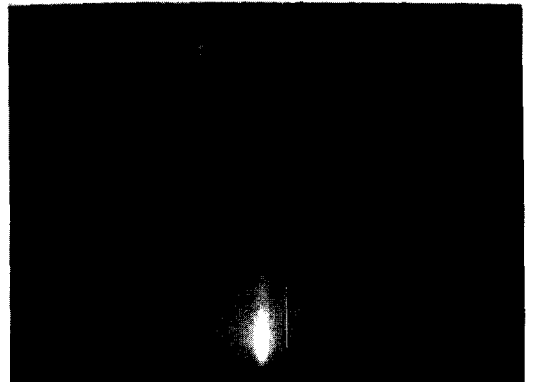
(a)  $T_G$  : 720°C, rms : 4.6 nm



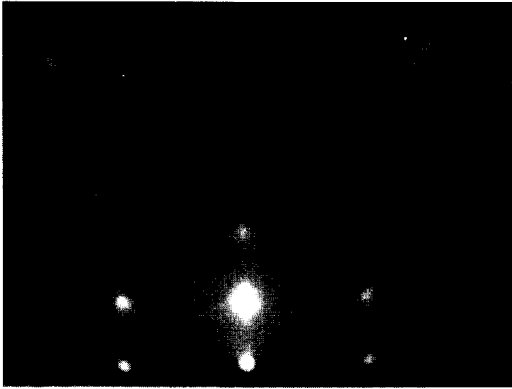
(b)  $T_G$  : 670°C, rms : 56.5 nm

그림 4. 성장온도의 변화에 따른  $In_xGa_{1-x}N$ 의 AFM 표면 상태

Fig. 4. AFM surface morphologies of  $In_xGa_{1-x}N$  at various growth temperatures.



(a)  $T_G$  = 720°C : <1100>



(b)  $T_G = 670^\circ\text{C} < \langle 1100 \rangle$

그림 5. 성장온도의 변화에 따른  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 의 RHEED patterns

Fig. 5. RHEED patterns of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  at various growth temperatures.

그림 4는  $720^\circ\text{C}$ 와  $670^\circ\text{C}$ 에서 성장된 두 시편에 대한 AFM 측정결과를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이  $670^\circ\text{C}$ 에서 성장된 시편의 표면에 대한 rms 거칠기(roughness)가  $56.5\text{ nm}$ 로 매우 거친데 그만큼 indium droplet 크기가 증가되었기 때문이다. 하지만  $720^\circ\text{C}$ 에서 성장된 시편 표면에 대한 rms 값은  $4.6\text{ nm}$ 로 표면 거칠기가 개선됨을 알 수 있다. Indium droplet은 계속해서 형성되지만 그 크기가 적어서 표면 거칠기가 향상되기 때문으로 분석된다.

4) RHEED(reflection high energy electron diffraction) 분석

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정의 성장조건에 따라 RHEED로 결정성을 조사하였다. RHEED 분석시 전자빔의 방향은  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 의  $[1100]$  방향으로 조사하였으며, 이때의 반사된 전자들의 회절 패턴을 관찰하였다. 결정성 분석에 사용된 시편은 성장온도가  $720^\circ\text{C}$ 와  $670^\circ\text{C}$ 로 성장시킨  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막에 대해서 수행하였다.

그림 5는  $720^\circ\text{C}$ 와  $670^\circ\text{C}$ 에서  $0.1\ \mu\text{m}$ 로 성장시킨  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막의 RHEED 회절 패턴을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이  $720^\circ\text{C}$ 에서 성장시킨  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막에 대해서는 약간의 facet을 갖는 단결정으로 성장된 것을 알 수 있다. 그러나  $670^\circ\text{C}$ 에서 성장시킨 시편에 대해서는 AFM 분석에서도 표면 거칠기가 크게 나타났듯이 indium droplet에 의한 3차원적인 결정성장이 유도되고 이에 따라 점차 결정성이 나빠지는 것으로 사료된다. 이상의 두가지 성장온도에서 성장된 시편에 대한 RHEED 회절 패턴을 통해

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막을 성장할 때,  $700^\circ\text{C}$  이하에서는 양호한 결정성의 박막을 얻기가 어렵고, 비교적 우수한 결정성을 얻기 위해서는 성장온도가  $700^\circ\text{C}$  이상으로 하여야 한다. 그러나 성장온도가  $700^\circ\text{C}$  이하인 경우라도  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  박막의 두께를 얇게 할 경우, 표면의 거칠기가 개선되고 광소자응용에 가능한 결정성이 얻어질 수 있다. [6]

5) XRD (X-ray diffraction) 분석

그림 6은  $700^\circ\text{C}$ 에서 TMGa/TMIn 유량비를 10/17  $\mu\text{ mole}$ ,  $\text{NH}_3$ 와  $\text{N}_2$  유량을 각각 7.3 slm, 4 slm, 5 sccm의  $\text{SiH}_4$ 를 도우핑하여 성장된 시편의 triple axis-XRD 분석결과이다. 성장된 시편의 두께는 약  $500\text{ \AA}$ 이었다. 이 두께는 DC-XRD 분석에는 매우 얇아서 강도(intensity)가 약하게 측정된다. 분석결과, undoped GaN peak외에 약 12%의 indium 조성을 갖는  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$  단결정 박막의 꼭지점이 나타남을 알 수 있다.

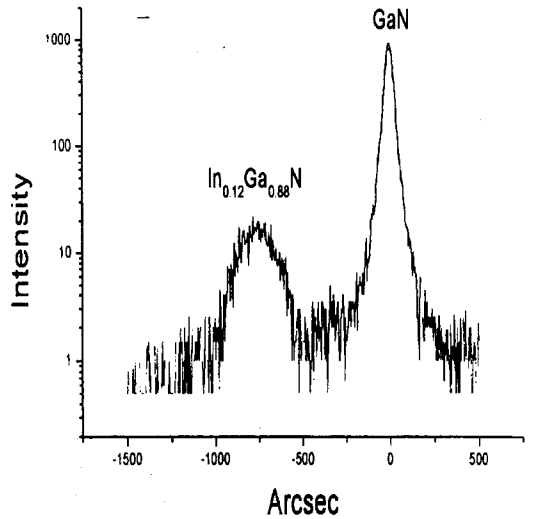


그림 6.  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ 의 Triple Axis X-ray Diffraction 스펙트럼

Fig. 6. Spectrum of triple axis X-ray diffraction of  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ .

그림 7는  $700^\circ\text{C}$ 에서 TMGa/TMIn 유량비를 10/25  $\mu\text{ mole}$ 으로 증가시켰고  $400\text{ \AA}$ 의  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  두께를 제외하고는 성장조건이 동일한 시편에 대해 triple axis-XRD 분석을 한 결과이다. 전반적으로  $500\text{ \AA}$ 인 시편보다 꼭지점 강도가 낮게 나타났으나  $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}$  단결정 박막의 꼭지점이 뚜렷하게 구분되는 것을 알

수 있다. 그러므로 700°C에서 성장된  $In_xGa_{1-x}N$ 는 단결정으로 그 결정성이 확인되었다.

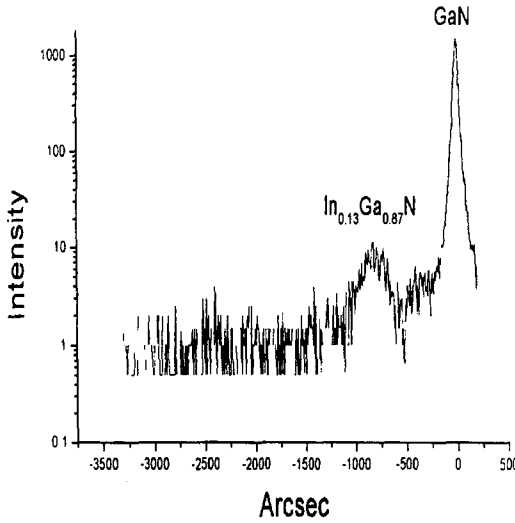


그림 7.  $In_{0.13}Ga_{0.87}N$ 의 Triple Axis X-ray Diffraction 스펙트럼

Fig. 7. Spectrum of triple axis X-ray diffraction of  $In_{0.13}Ga_{0.87}N$ .

### 2. Si-Zn co-doped $In_xGa_{1-x}N$ 단결정 성장

$In_xGa_{1-x}N$ 의 조성 제어비가 20% 이상으로 제어하기 어려운 상태에서 청색 파장대를 조절하기 위해서 Si과 Zn을 함께 도우핑하여  $In_xGa_{1-x}N$  박막을 성장시켜 청색 광소자에의 응용 가능성을 검토하였다. 이 시편의 성장온도와 반응압력은 800°C와 200 torr 이었다. Zn가 도우핑된  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막을 조사하기 위해 먼저 다양한 성장조건하에서  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막을 성장시켰다.  $SiH_4$ 와  $DMZn$  유량비는 각각 2.5 sccm과 10 nmole의 성장조건으로 하고, Zn가 도핑된  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막의 두께는 약 400Å이 되게 하였다. PL 측정은 He-Cd 레이저를 이용하여 상온에서 광특성을 측정하였다.

그림 8은 800°C에서 Si-Zn을 동시 도핑하여 성장시킨  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막에 대한 상온에서의 PL 측정 결과를 나타낸 것이다.  $DMZn$  유량은 10 nmole로 고정시키고,  $TMGa$ 와  $TMin$  유량비를 3/10 및 10/30  $\mu$ mole로 변화시켜 성장된 시편에 대한 결과이다. 결과에서  $TMGa$ 의 유량변화에 따라 방출(emission) 파장대의 shift가 있고  $In_xGa_{1-x}N$ 의 방출강도에도 약간의 차이가 있다. 이는  $TMGa/TMin$  유량비를 증가시켜 성장한 시편은 상대적으로  $TMGa$  유량

이 적기 때문에 그 만큼의 indium이 Ga site로 유입되었기 때문이다. 412 nm의 꼭지점에서  $In_xGa_{1-x}N$ 의 band-edge emission(BE)에 의한 꼭지점이 발생하고 450 nm와 458 nm의 꼭지점에서 Zn-Si에 의한 주계-받계쌍(donor-to-acceptor:DA pair) 꼭지점이 발생하는 것이 관측되고 있다. Nakamura의 실험에 의하면 BE 꼭지점에 비해 에너지가 0.4~0.5 eV 작은 DA pair 꼭지점이 관측되었으나 본 실험에서는 그보다 방출에너지 차이가 작으며 약 0.3 eV로 나타났다. [7]

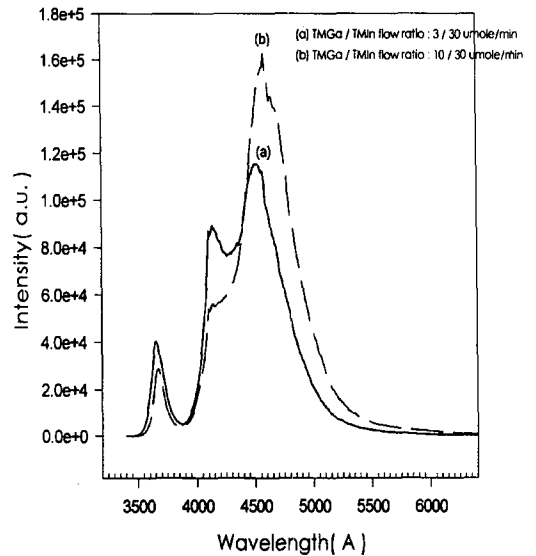


그림 8. He-Cd 레이저를 이용한 Si-Zn 도핑된  $In_xGa_{1-x}N$ 의 PL 스펙트럼

Fig. 8. PL spectrums of Si-Zn co-doped  $In_xGa_{1-x}N$  by He-Cd laser.

### 3. $In_xGa_{1-x}N$ MQW 구조 성장

캐리어의 에너지 상태는 양자우물내에 구속된 캐리어들에 의해서 bulk 형태의  $In_xGa_{1-x}N$ 의 band-edge 이상으로 증가시킬 수 있어 양자우물 구조에 대한 관심이 집중되고 있다. 양자우물 구조내에 구속된 캐리어 상태들간의 발광성 천이(radiative transition)는 광소자로서 응용할 수 있고 레이저 동작도 가능하게 된다. MQW 레이저의 장점은 문턱전류밀도(threshold current density)가 낮고, 온도에 의한 영향을 감소시킬 수 있다는 것이다. 그래서 청색 및 보라색 LED 및 LD의 응용을 위해서 wide-band-gap 질화물 반도체를 이용한 QW 구조의 성장과 그 특성 분석이 필요하다.

본 실험에서는 (0001) 사파이어 기판을 이용하여  $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$  MQW를 성장시켜 그 광학적 특성을 고찰하였다. 먼저 undoped GaN 단결정 박막을 1020°C의 고온에서 성장시킨 후, undoped 형태로 well, barrier 각각의 indium 조성이 15%, 5%인 MQW  $In_xGa_{1-x}N$  박막을 성장하였다.  $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$  MQW는 다섯번의 전체 성장주기로 하여 well과 barrier층의 두께를 각각 25Å과 50Å로 성장시켰다. 그리고 well층과 barrier층의 TMIn 유량은 각각 30  $\mu$  mole과 5  $\mu$  mole로 하였고 TMGa 유량은 10  $\mu$  mole으로 고정시켰다. 성장압력은 200 torr 였다.

그림 9은 700°C에서 성장된 MQW  $In_xGa_{1-x}N$  단결정 박막에 대해서 He-Cd 레이저를 이용하여 20K의 저온 PL 측정결과를 나타낸 것이다. 그림에서 356.7 nm의 파장대에서의 꼭지점은 bound exciton에 의한 것이고 377 nm의 꼭지점 위치는 DA pair에 의한 것이다. 그리고 397 nm 파장대의 강한 꼭지점은 MQW에 의한 것으로 사료된다.<sup>[8]</sup>

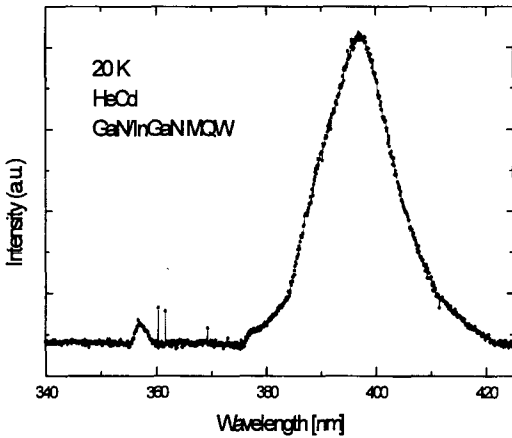


그림 9. He-Cd 레이저를 이용한  $In_xGa_{1-x}N$  MQW의 PL 스펙트럼  
Fig. 9. PL spectrum of  $In_xGa_{1-x}N$  MQW by He-Cd laser.

그림 10은 308 nm의 광원을 갖는 XeCl excimer 레이저를 이용하여 20K 저온에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 He-Cd 레이저를 이용한 측정 결과와 유사하게<sup>[8]</sup> 356.8 nm 위치에 bound exciton에 의한 꼭지점이 나타나고 파장이 약간 증가된 378.6 nm 위치에서 DA pair, 그리고 395.2 nm에서 MQW에 의한 꼭지점이 관측되는

것을 알 수 있다.

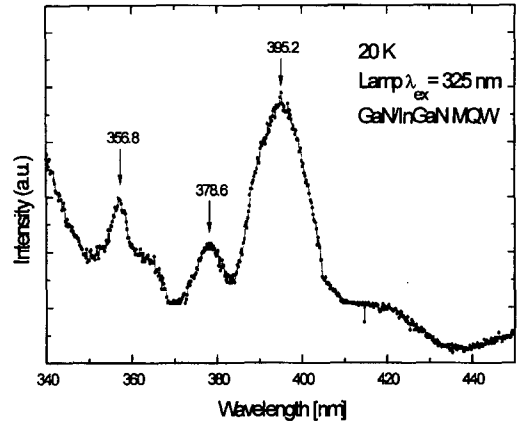


그림 10. Excimer 레이저를 이용한  $In_xGa_{1-x}N$  MQW의 PL 스펙트럼  
Fig. 10. PL spectrum of  $In_xGa_{1-x}N$  MQW by excimer laser.

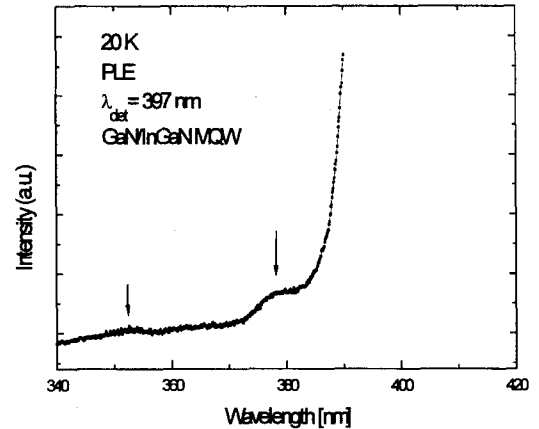


그림 11. He-Cd 레이저를 이용한  $In_xGa_{1-x}N$  MQW의 PLE 스펙트럼  
Fig. 11. PLE spectrum of  $In_xGa_{1-x}N$  MQW by He-Cd laser.

그림 11 MQW의 발광 꼭지점이 발생하는 원인을 확인하기 위해 lamp을 광원으로 하여 spectrometer 1을 scan하여 파장을 변화시키고 spectrometer 2를 397 nm에 놓고 측정된 PLE 결과를 나타내었다. 이때 spectrometer 2의 397 nm 위치는 He-Cd 레이저를 이용하여 측정된 최대 파장이다. 결과에서 보듯이 353 nm 부근에서 미약한 꼭지점과 379 nm에서 하나의 꼭지점이 있으므로 보아 QW의 PL 스펙트럼은 GaN barrier의 exciton과 DA pair에 있던 캐리어들이 유입되면서 발생하는 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 EMCORE D-125 MOCVD를 이용하여 사파이어 기판위에  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  단결정 박막을 성장시킨 후 그 특성을 조사하였다. 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  결정막의 성장은 고온의 성장온도에서는 분압이 높아 쉽게 해리가 되어 원하는 조성비와 파장을 얻기 어려웠다. 그리고 성장온도가 낮으면 해리는 쉽게 일어나지 않지만 성장된 결정막의 결정성이 나빠지는 것으로 나타났다.  $700^\circ\text{C}$ 에서 성장된 시편에 대해서 triple axis-XRD 분석을 통하여 indium 조성은 각각 12%와 13%까지 우수한 결정성을 얻었다.  $700^\circ\text{C}$  이하의 성장온도에서는 결정성이 크게 저하되었다. 그러나 이러한 경향은 박막의 두께를 얇게 할 경우 개선되었다.

한편 MQW 구조의  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 인 경우, MQW의 방출 꼭지점이 관측되었다.  $800^\circ\text{C}$ 의 성장온도에서 성장된 Si-Zn co-doped  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  막인 경우, Zn에 의한 주계-받계쌍 천이가 일어나는 것으로 조사되었고 주 꼭지점은 460~470 nm에 관측되었다. 이상의 실험결과로부터 MQW  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  막을 활성층으로 하는 이중접합 구조를 통해 청색발광 LED 소자를 제조할 경우 비교적 높은 효율의 소자를 제조할 수 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

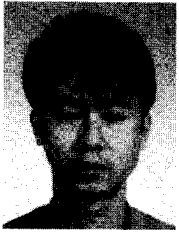
- [ 1 ] R. D. Dupuis, "Epitaxial growth of III-V nitride semiconductor by MOCVD", Journal of Crystal Growth, vol. 178, pp. 56-66, 1997.
- [ 2 ] T. Matsuoka, N. Yoshimoto, T. Sasaki, and A. Katsui, "Wide-Gap Semiconductor

*InGaN and InGaAlN grown by MOVPE*", J. Electron. Mater. 21(1992), 157.

- [ 3 ] F. Scholz, V. Harle, F. Steuber, H. Bolay, A. Dornen, B. Kaufmann, V. Syganow, A. Hangleiter, "Low pressure MOVPE of GaN and GaInN/GaN heterostructures", Journal of Crystal Growth, vol. 170, pp. 321-329, 1997.
- [ 4 ] R. J. Molnar, R. Singh and T. Moustakas, "Blue-violet light emitting Gallium nitride p-n junctions grown by electron cyclotron-resonance-assisted molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett., vol. 66, pp. 268-270, 1995.
- [ 5 ] N. Yoshimoto, T. Matsuoka, T. Sasaki and A. Katsui, "Photoluminescence of InGaN films grown at high temperature by MOVPE", Appl. Phys. Lett., vol. 59, pp. 2251-2255, 1991.
- [ 6 ] Suk-Hun Lee, Sung-Bum Bae, Sung-Ho Hahm, Heung-Sik Tae, Jeung-Soo Huh, Young-Hyun Lee, Jung-Hee Lee, "Growth of High Quality  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  by MOCVD", The 5th Korean Conference on Semiconductors, 25/2, A-46, pp. 97-pp98, 1998.
- [ 7 ] S. Nakamura and Takashi Mukai, "High quality InGaN films grown on GaN films", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 31, pp. L1447-L1449, 1992.
- [ 8 ] C. J. Sun, M. Zubair Anwar, Q. Chen, J. W. Yang, and M. Asif Khan, "Quantum shift of band-edge stimulated emission InGaN/GaN MQW LEDs", Appl. Phys. Lett. vol. 70, no. 22, pp. 2978-2981, 1997.



저 자 소 개



李 昔 憲(正會員)

1969년 4월 27일생. 1995년 2월 제주대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학부). 1997년 2월 경북대학교 전자전기공학부 반도체 전공 졸업(석사). 1997년 현재 경북대학교 전자전기공학부 반도체 전공(박사과정). 주관심분야는 GaAs MOSFET, 질화물 반도체 성장 및 GaN

계 광소자

李 宰 承(正會員)

1970년 6월 10일생. 1996년 2월 경북대학교 물리학과 졸업(학부). 1997년 2월 경북대학교 전자전기공학부 반도체 전공 졸업(석사). 1997년 현재 경북대학교 전자전기공학부 반도체 전공(박사과정). 주관심분야는 질화물 반도체 성장 및 GaN계 전자 및 광소자



許 增 秀(正會員)

1960년 6월 10일생. 서울대학교 공과대학 금속공학과(학부). 서울대학교 공과대학 금속공학과(석사). M.I.T. 전자재료(박사). 1987년 ~ 1994년 MIT, 연구조교 1994년 ~ 1995년 KIST, 위촉연구원. 1994년

~ 현재 경북대학교 금속공학과 조교수. 주관심분야는 전자재료(박막), 화합물 반도체, Display 재료, 광전자공학

李 炯 圭(正會員) 第 33卷 D編 第 9號 參照

현재 충북대학교 전기전자공학부 반도체 전공 부교수

李 承 夏(正會員) 第 31卷 B編 第 7號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 조교수

咸 成 鎭(正會員) 第 34卷 D編 第 9號 參照

현재 경북대학교 센서기술연구소 전임강사

李 龍 鉉(正會員) 第 31卷 A編 第 8號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

李 正 熙(正會員) 第 32卷 A編 第 11號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수