

MOCVD 성장조건이 InN/GaN 다층박막의 발광세기에 미치는 영향

김현수[†] · 이정주 · 정순영 · 이정용* · J.Y. Lin** · H.X. Jiang**

경상대학교 자연과학대학 물리학과

*한국과학기술원 전자재료공학과

**Department of Physics, Kansas State University

The Effect of MOCVD Growth Parameters on the Photoluminescence Intensity of InN/GaN Multi-layers

H.S. Kim[†], J.J. Lee, S.Y. Jeong, J.Y. Lee*, J.Y. Lin**, and H.X. Jiang**

Department of Physics, Gyeongsang National University

*Department of Electronic Materials Engineering, KAIST

**Department of Physics, Kansas State University

(2001년 7월 26일 받음, 2002년 3월 13일 최종수정본 받음)

Abstract InN/GaN multi-layers were grown by metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD) in order to get the appropriate structure for an high power blue-green light emitting diode(LED), and effects of growth conditions (growth temperature, pressure, and trimethylindium(TMIn)-NH₃-N₂ flow rate) on the integrated photoluminescence (PL) intensity and PL peak energy in InN/GaN multi-layers were investigated. The optimized growth conditions with the highest integrated PL intensity for InN/GaN multi-layers were obtained: the growth temperature at 780°C, the growth pressure at 325 Torr, the TMIn flow rate with 150 ml/min, the NH₃ flow rate with 3.2 l/min, and N₂ flow rate with 2 l/min.

Key words : III-nitride semiconductors, MOCVD, Photoluminescence, multi-layers

1. 서 론

3족원소의 질화물로 형성되는 밴드갭이 큰 반도체재료들에 대한 연구가 최근 많이 수행되고 있는데, 그것은 A_xGa_{1-x}N (A = In, Al) 등의 화합물에 의하여 밴드갭을 1.9 eV에서 6.2 eV까지 변화시킬 수 있기 때문에 청색 및 자외선 영역에서 작동하는 LED(light emitting diode)나 LD(laser diode)와 같은 광전자 소자를 제작할 수 있는 반도체일 뿐만 아니라, 고온 고전력소자, HEMT(high electron mobility transistor), SAW(surface acoustic wave) 소자 등의 전자소자에 응용 가능성이 매우 높기 때문이다.^{1~4)} 이들 반도체중 특히 InGaN는 청색-녹색의 발광소자를 만드는데 이용되는 재료로서 개발되고 있으며, 발광소자의 효율 및 출력을 높이려는 연구가 계속되고 있다.

Wurtzite 구조를 갖는 InGaN 반도체박막은 다음과 같은 몇 가지의 특이한 성질을 갖는다. 투과전자현미경 관측에 의하면 이 물질은 매우 높은 전위결함 밀도(10⁸-10¹²cm⁻²)를 가지고 있으며^{5,6)}, 입방결정구조를 갖는 다른 III-V족 화합물반도체와는 달리 매우 큰 분극특성을 가지고⁷⁾, GaN속에서 InN의 혼화성(miscibility)이 낮아 InGaN 박막 내에 상 분리(phase segregation)가 일어나거나 In의 분포

가 불균일하게 된다.^{8~10)} 이와같은 성질들은 다른 화합물반도체에 비해 InGaN의 전기적·광학적 특성에 더 크게 영향을 줄 것으로 예상된다. 특이한 현상은 수많은 전위결함들이 존재함에도 불구하고 InGaN 양자우물(quantum well)들에서 강한 발광특성을 갖는다는 것인데, 그 원인들이 여러 연구집단에 의해 다르게 발표되고 있다. 몇몇 연구집단들은 piezoelectric field에 의한 quantum confined Stark effect(QCSE)가 에너지 상태들을 결정하고 지배적인 재결합기구라고 지적하였으나^{11~13)}, 최근에는 국소화된 엑시톤(localized exciton)들이 발광과정에 중요한 역할을 한다는 것이 발견되었다.^{14~20)} 그리하여 여러 연구집단들은 InGaN박막 내에서 국소적으로 상 분리에 의해 형성된 In이 많은 영역 즉 양자점(quantum dot)과 비슷한 구조에 국소화가 일어난다는 것을 인용하고 있다.^{16~20)} 즉 InGaN/GaN 양자우물에서의 발광은 결정성장시 스스로 생성되는 InN 미세덩어리들(clusters)에 의해 국소화된 상태들(localized states)에서의 발광성 재결합(radiation recombination)에 의한 것이라고 할 수 있다. 따라서 InN cluster들의 수가 많을수록 발광세기(photoluminescence intensity)가 높아질 것이며, InN/GaN 층을 반복 성장함으로써 InN cluster들이 더 많이 생성될 것으로 예상된다.

[†] E-mail: hskim@nongae.gsnu.ac.kr

발광세기에 크게 영향을 주는 InN/GaN 다층박막의 미세 구조는 결정성장 조건에 따라 변할 것이며, 발광세기가 가장 큰 InN/GaN 다층박막의 성장조건을 찾는 것은 매우 중요하다. 투과전자현미경을 이용하여 발광기구에 영향을 주는 미세구조를 관측할 수 있겠지만, 투과전자현미경 관측결과를 결정성장에 피드백(feedback)시켜 최적성장조건을 찾는 것은 긴 시일이 걸릴 것이다.

본 연구에서는, 상온에서의 발광세기 측정으로부터 발광세기가 가장 큰 InN/GaN 다층박막의 MOCVD 성장조건을 구하였다. 먼저 결정성장에 가장 큰 영향을 미치는 성장온도(780°C) 및 압력(325 Torr)을 결정하고, trimethylindium (TMIn), NH₃, 그리고 N₂들의 유량이 발광세기 및 발광피크 에너지에 미치는 영향을 조사하였는데 유량이 각각 150 ml/min, 3.2 l/min, 2 l/min 일 때 성장된 InN/GaN 다층박막의 발광세기가 가장 높았다.

2. 실험 방법

시료들은 저압 금속유기화학기상증착법(MOCVD)으로(0001) 사파이어(Al₂O₃) 기판위에 성장하였으며, 원물질들로(source materials) trimethylgallium(TMGa), trimethylindium(TMIn), NH₃, 운반가스로 질소(N₂)를 사용하였다. 먼저 550°C에서 사파이어 기판위에 두께 250Å 정도의 GaN 핵생성층(nucleation layer)을 성장한 후, 1028°C에서 두께 1μm 정도의 GaN 층을 성장하고 성장조건들을 변화시키면서 InN/GaN 다층박막을 성장하였으며 맨 윗 층은 보호막으로 두께 120Å 정도의 GaN 층을 성장하였다.

InN/GaN 다층박막은 두께 30Å의 InN와 두께 60Å인 GaN 층이 교대로 5주기를 가지는 구조로 성장되었으며, 여기서 각 층의 두께는 본 연구에 사용된 MOCVD 장치의 각 물질에 대한 성장속도에 의해 계산된 값이다. InN/GaN 다층박막은 연속적으로 성장되어야 하기 때문에 각 층의 성장온도가 같아야 하는데, InN 및 GaN의 에피택셜(epitaxial layer)을 성장할 때 최적 성장온도는 각각 500°C 및 1028°C이다. 따라서 InN/GaN 다층박막의 최적 성장온도는 위 두 온도 사이일 것이며, 본 연구에서는 성장온도를 750°C에서 790°C까지 10°C간격으로 변화 시켰다. 그리고 성장압력은 GaN 성장조건인 325 Torr를 기준으로 25 Torr씩 증감시키면서 275 Torr에서 375 Torr까지 변화시켰다. 그 외 TMIn, N₂, NH₃의 유량은 각각 100~200 ml/min, 1.5~2.5 l/min, 2.0~3.6 l/min 범위에서 조절되었다.

PL(photoluminescence) 측정장치를 사용하여 상온에서의 발광특성을 조사하였는데, PL 장치는 이중단색화장치(double monochromator), 광증배관(photomultiplier tube), 그리고 시료장착장치로 구성되어 있다. 여기광원(excitation light source)으로는 주파수 증배기(frequency doubler)를 가지는 yttrium-aluminium-garnet(YAG) 레이저에 의해 펌핑되어지는 색소(dye) 레이저를 이용하였다. 색소레이저로부터 나온 레이저는 두 번째 주파수 증배기를 거쳐 자외선 영역인 4.5 eV의 에너지를 가지며, 평균 출력은 20 mW이고 선포는 약 0.2 meV이다. 시

료의 표면에 조사되는 레이저빔의 지름은 0.5 mm 정도이다. 시료로부터의 발광세기는 여기광원의 세기나 광학적 정렬상태에 따라 달라질 수 있기 때문에, 발광세기를 비교하기 위해서는 항상 같은 조건에서 측정되어야 하며, 시료 외적인 측정오차를 줄이기 위해 측정 때마다 기준시료도 같이 측정되어졌다. 그리고 투과전자현미경(transmission electron microscope: TEM)을 이용하여 InN/GaN 다층박막의 미세구조를 관측하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 성장조건이 다른 InN/GaN 다층박막들의 대표적인 상온 발광스펙트럼(PL spectrum)들을 비교한 것인데, 성장온도는 780°C로 같고, 성장압력은 각각 275 Torr 및 325 Torr인 시료들에 대한 것이다. InN/GaN 다층박막의 주 발광피크에너지는 각각 2.70 eV 및 2.78 eV이고, 스펙트럼의 면적으로 발광세기를 나타낼 때, 성장조건에 따라 발광세기가 크게 변한다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 성장조건이 발광세기에 미치는 영향에 대해 주로 논의되었지만, InN/GaN 물질계에서 발광기구를 규명하는 것도 중요한 과제일 것이다. InN와 GaN의 상온에서의 밴드갭 에너지는 각각 1.89 eV 및 3.39 eV²¹⁾인데, InN/GaN 다층박막에서의 발광피크에너지는 2.7~2.8 eV 정도로 두 밴드갭에너지의 중간 값과 비슷하여 In_{0.5}Ga_{0.5}N에서 발광될 수 있는 에너지 위치이다. 그러나, 앞에서 언급된 바와 같이 InN와 GaN 간의 혼화성이 매우 낮기 때문에 InGa_{0.5}N가 성장되었을 확률은 매우 낮으며, InN 및 GaN 층이 편탄하게 2차원적으로 잘 성장되어져 InN/GaN 양자우물구조가 형성되었다고 보기에는 발광피크에너지 위치가 InN 밴드갭에너지와 너무 큰 차이(~0.8 eV)를 보인다. 따라서 이 영역에는 InGa_{0.5}N/GaN 다층박막 성장 후 발광재결합 센터로 많은 연구자들^{16~20, 22)}에 의해 투과전자현미경으로 관측된 바 있는 InN cluster 들이 형성되어 있을 것으로 예상되며, 실

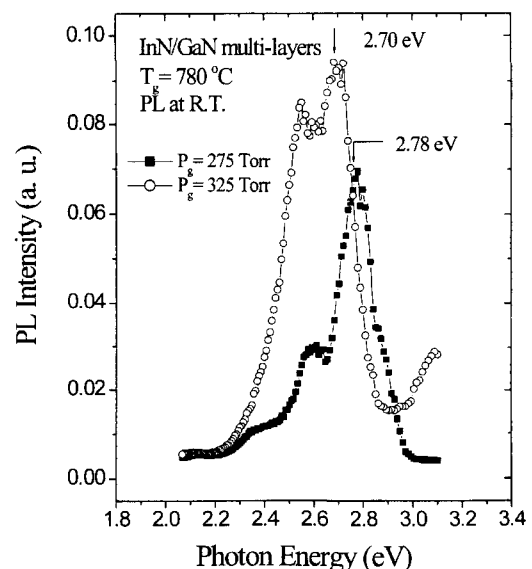


Fig. 1. Room-temperature photoluminescence spectra of the InN/GaN multi-layers grown by MOCVD.

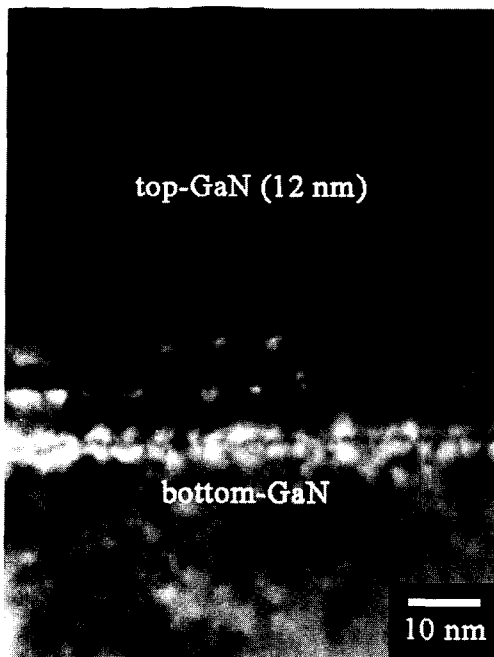


Fig. 2. Cross-sectional TEM image of the InN/GaN multi-layers grown at 780°C and 325 Torr by MOCVD.

계 관측결과 이와 유사한 것들을 관측할 수 있었다.

Fig. 2는 성장온도와 성장압력이 각각 780°C 및 325 Torr 인 성장조건에서 성장한 InN/GaN 다층박막의 단면 투과전자현미경 사진인데, 표면층 12 nm 두께의 GaN 보호막과 아래 GaN층 사이에 5주기의 다층박막이 형성되어 있는 것이 관측된다. 사진에서 보듯이 옆쪽으로 흑백이 대비되어 울퉁불퉁하게 보이는 다층박막의 계면들은 InGaN 다층양자우물 등에서 관측된바 있는²⁰⁾ 양자점 형태의 InN cluster와 아주 유사하며, 공간적으로 균일한 분포를 가지지는 않는다. 그리하여 Fig. 1에서와 같은 발광스펙트럼의 피크 위치 및 반치폭은 cluster들의 크기의 분포와, 그리고 발광세기는 cluster들의 밀도와 밀접한 관계가 있으며 InN/GaN 다층박막에 공간적으로 분포하는 InN cluster들에 엑시톤의 국소화가 이루어져 발광재결합의 효율이 증가하게 된다. 결과적으로 InN cluster의 밀도가 높을수록 발광 세기가 커질 것이다.

InN/GaN 다층박막에서 성장조건이 발광세기에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 먼저 결정구조에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 성장온도를 변화 시켰다. Fig. 3은 성장온도 외에 다른 성장조건은 같게 하고 성장온도를 750°C에서 790°C까지 변화시키면서 성장한 InN/GaN 다층박막의 발광세기(Int(I))와 발광피크에너지(E_p)의 변화를 보여준다. 750°C이상에서 InGaN를 성장하면 상 분리가 강하게 일어난다는 것은 잘 알려져 있다.^{23,24)} 따라서 InN와 GaN가 서로 혼합되지 않고 InN cluster가 형성되기 쉽도록 성장온도를 750°C이상으로 하였는데, 성장온도가 높아짐에 따라 발광세기가 조금씩 증가하여 780°C 근처에서 가장 크고 더 이상 온도를 높이면 다시 감소하는데, E_p 는 성장온도가 높아짐에 따라 점점 증가하는 현상을 보인다.

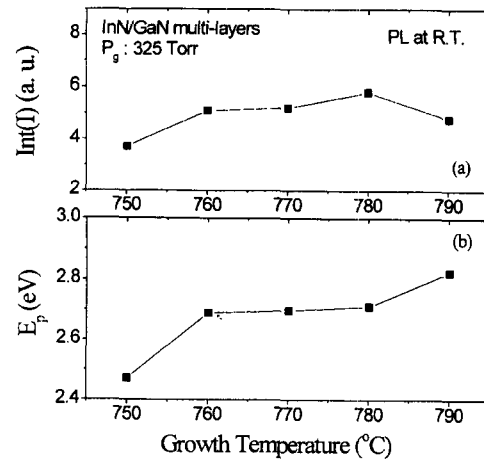


Fig. 3. Integrated photoluminescence(PL) intensity(Int(I)) (a) and PL peak energy(E_p), (b) as a function of the growth temperature(Tg).

InN는 GaN에 비해 해리온도(dissociation temperature)가 낮기 때문에 성장온도가 높은 경우 InN cluster의 크기가 작아질 것으로 예상되며 양자구속(quantum confinement) 현상으로 E_p 가 점점 높아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 MOCVD법으로 박막을 성장할 때 성장된 박막의 특성에 미치는 성장온도의 영향은 기판위에서 가스상태의 화학적 성질 변화에 의해서라기 보다는 결정의 조직화 및 성장에 기여하는 표면기구(surface mechanism)들의 변화에 의한 것이다. 성장온도가 높아짐에 따라 성장표면에서 In의 운동이 활발하여 InN 핵생성 밀도가 커지며 따라서 InN cluster의 밀도는 높아지는 반면 그 크기는 작아져 발광세기 및 E_p 가 점점 증가하나, 성장온도 790°C 이상에서는 InN의 해리현상이 증가하여 InN cluster의 밀도가 다시 감소하여 발광세기가 낮아지는 것으로 이해된다.

Fig. 3의 결과를 바탕으로 성장온도를 780°C로 고정하고 성장압력을 275 Torr에서 375 Torr까지 변화시키면서 InN/GaN 다층박막을 성장하여 상온 PL측정을 한 결과, 성장압력에 대한 발광세기(Int(I)) 및 발광피크에너지(E_p) 변화는 Fig. 4와 같다. 성장압력이 325 Torr일 때 가장 높은 발광세기를 보이나 E_p 는 압력변화에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. MOCVD법으로 박막을 성장할 경우 반응관의 압력을 대기압보다 낮은 저압상태로 함으로서 얻는 장점은 precursor 분자들이 서로 접촉하는 시간을 줄여 기판표면에 도달하기 전에 서로 반응이 일어날 가능성을 줄여준다는 것이다. 일반적으로 MOCVD법으로 성장되는 박막들의 특성이 성장압력에 따라 크게 변하지는 않지만 본 연구에 사용된 저압 MOCVD장치에서는 GaN 에피층 성장에 주로 적용되는 성장조건인 325 Torr에서 성장한 InN/GaN 다층박막이 가장 높은 발광세기를 보인다. 다음으로 성장온도 및 압력 외에 다른 성장조건들의 영향을 조사하기 위해 성장온도 및 압력을 각각 780°C, 325 Torr로 고정하고 trimethylindium(TMIn), NH_3 , 그리고 N_2 의 유량을 변화시키면서 InN/GaN 다층박막들을 성장하여 상온 PL 측

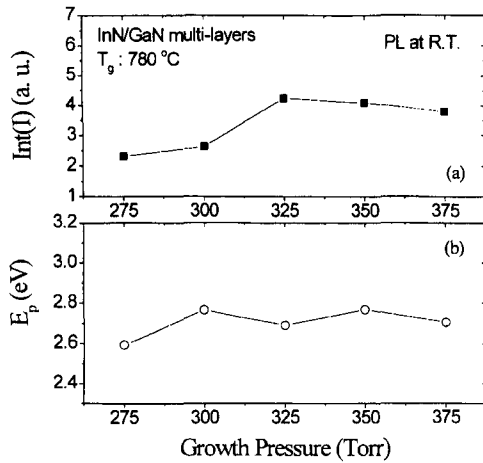


Fig. 4. Integrated photoluminescence(PL) intensity(Int(I)) (a) and PL peak energy(E_p), (b) as a function of the growth pressure(P_g).

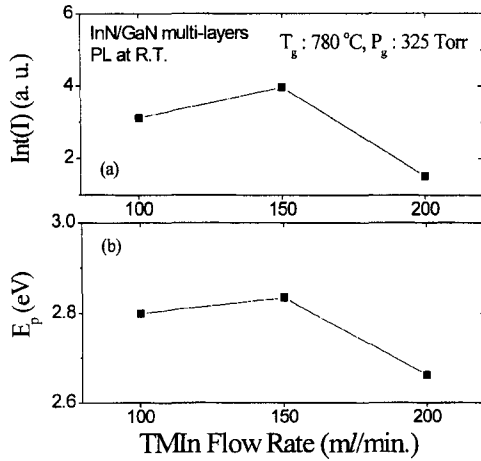


Fig. 5. Integrated photoluminescence(PL) intensity(Int(I)) (a) and PL peak energy(E_p), (b) as a function of the trimethylindium(TMIn) flow rate.

정을 하였다.

Fig. 5는 TMIn의 유량변화에 따른 InN/GaN 다층박막의 발광세기(Int(I)) 및 발광피크에너지(E_p)의 변화를 보여주는데 유량 150 ml/min까지 발광세기가 점점 높아지다 200 ml/min에서는 낮아지며, E_p도 유량이 많아지면 낮아진다. 화합물반도체를 MOCVD법으로 성장할 때 V/III 그래프분자비(molar ratio)는 성장된 물질의 전기적특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만, GaN 성장의 경우 광학적 특성도 V/III 그래프분자비에 영향을 받으며 특히 V/III 그래프분자비가 낮은 경우 광학적 특성이 급격히 나빠진다.²⁵⁾ InN/GaN 다층박막의 경우도 Fig. 5(a)에서 보듯이 TMIn 유량이 증가하여 V/III 그래프분자비가 작아지면 발광세기가 낮아지는 것을 알 수 있으며, Fig. 5(b)는 유량이 증가하면서 InN/GaN 다층박막내에서 전체적으로 In함량이 늘어나게 되어 E_p가 낮아지는 모습을 보여준다.

MOCVD법으로 InN/GaN 다층박막을 성장할 때 V족

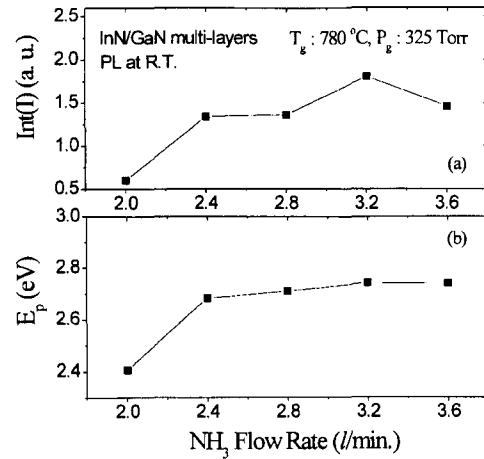


Fig. 6. Integrated photoluminescence(PL) intensity(Int(I)) (a) and PL peak energy(E_p), (b) as a function of the NH₃ flow rate.

원소의 원료물질로 NH₃가 사용되는데, V/III 그래프분자비를 높이기 위해 NH₃유량은 TMIn에 비해 아주 크게 해야 한다. Fig. 6은 NH₃유량 변화에 따른 InN/GaN 다층박막의 발광세기(Int(I)) 및 발광피크에너지(E_p)의 변화를 보여주는데, NH₃유량이 증가함에 따라 발광세기가 높아지는 경향을 보이다 3.2 l/min 일 때 가장 높고 E_p도 점점 높아지는 경향을 보인다. NH₃유량이 증가함에 따라 발광세기가 높아지는 경향은 앞에서 언급했듯이 MOCVD 법에 의한 질화물반도체 성장시 V/III 그래프분자비가 커지면 성장된 물질의 광특성이 좋아지는 일반적인 현상에 잘 따르지만, 유량이 지나치게 많아지면 다시 나쁜 영향을 주는 것으로 나타난다. 그리고 NH₃유량이 증가함으로써 E_p가 높아지는 현상은 Fig. 5(b)의 경우와는 반대로 성장된 InN/GaN 다층박막내에 전체적으로 In 함량이 감소하기 때문일 것으로 보이지만 실제 NH₃유량 2.4 l/min 이상에서는 E_p의 변화가 거의 없다.

마지막으로 MOCVD법으로 InN/GaN 다층박막을 성장할 때 운반가스(carrier gas)가 InN/GaN 다층박막의 발광특성에 미치는 영향을 조사하였다. 일반적으로 InGaN박막을 MOCVD법으로 성장할 때 운반가스로 H₂ 및 N₂ 혹은 두 가스의 혼합물이 사용되어지고 있는데, 운반가스의 성질이 결정성장시 In의 혼입(incorporation)에 중요한 역할을 하며, 특히 N₂를 운반가스로 사용할 때 In의 혼입을 증진시킨다는 보고가 있다.²⁶⁾ Fig. 7은 N₂를 운반가스로 사용하여 유량을 1.5 l/min에서 2.5 l/min 까지 변화시키면서 성장된 InN/GaN 다층박막의 발광세기(Int(I)) 및 발광피크에너지(E_p)의 변화모습을 보여준다. 예상대로 N₂유량이 커지면 In의 혼입이 증가하여 InN cluster 수가 많아져 발광세기가 높아지는 경향을 보이며 2.0 l/min 일 때 발광세기가 가장 높게 나타난다. 반면에 유량이 더 커지면 다시 발광세기가 낮아지는데 이와 같은 현상의 원인은 명확하지 않다. 그리고 Fig. 7(b)에서 N₂유량이 커질수록 E_p가 높아지는 경향은 InN cluster들의 밀도는 높아지나 그 크기는 평균적으로 작아지기 때문인 것으로 이해된다.

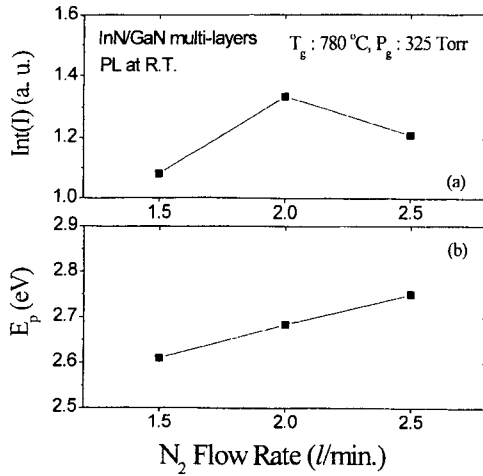


Fig. 7. Integrated photoluminescence(PL) intensity(Int(I)) (a) and PL peak energy(E_p), (b) as a function of the N₂ flow rate.

4. 결 론

상온에서의 발광세기 측정으로부터 발광세기가 가장 큰 InN/GaN 다층박막의 MOCVD 성장조건을 구하였다. 먼저 결정성장에 가장 큰 영향을 미치는 성장온도 (780 °C) 및 압력 (325 Torr) 을 결정하고, trimethylindium (TMIn), NH₃, 그리고 N₂ 들의 유량이 발광세기 및 발광피크 에너지에 미치는 영향을 조사하였는데 유량이 각각 150 ml/min, 3.2 l/min, 2 l/min 일 때 성장된 InN/GaN 다층박막의 발광세기가 가장 높았다.

MOCVD법으로 InN/GaN 다층박막을 성장할 때 형성되는 InN cluster들의 밀도 및 크기의 분포가 성장조건에 따라 달라지며, 이것이 성장된 박막의 발광세기 및 발광피크 에너지에 영향을 주는 것으로 설명하였지만, 이것을 명확히 하기 위해 추가적인 연구가 계속되고 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2000-042-D00026)으로 수행되었으며, 투과전자현미경 측정에 도움을 주신 전희정 님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- H. Morkoc, S. Strite, G.B. Gao, M.E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burns, *J. Appl. Phys.* **76**, 1363 (1994).
- S.D. Lester, F.A. Ponce, M.G. Crawford, and D.A. Steigerwald, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1249 (1995).
- S. Nakamura, M. Senoh, S. I. Nagahama, N. Iwasa, J. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 2105 (1996).
- O. Alotas, W. Kim, Z. Fan, A. Bothkarev, A. Salvador, S. N. Mohammad, B. Sverdlov, and H. Morkoc, *Electron. Lett.* **31**, 1389 (1995).
- S. Nakamura, *Science* **281**, 956 (1998).
- I. Lo, K.Y. Hsieh, S.L. Hwang, L.W. Tu, C. Mitchel, and A.W. Saxler, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2167 (1999).
- O. Ambacher, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**, 2653 (1998).
- I. Ho and G.B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2701 (1996).
- M.D. McCluskey, L.T. Romano, B.S. Krusor, D.P. Bour, N.M. Johnson, and S. Brennan, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1730 (1998).
- N.A. El-Masry, E.L. Piner, S.X. Liu, and S.M. Bedair, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 40 (1998).
- T. Takeuchi, S. Sato, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2*, **36**, L382 (1997).
- S.F. Chichibu, A.C. Abare, M.S. Minsky, S. Keller, S.B. Fleischer, J.E. Bowers, E. Hu, U.K. Mishra, L.A. Coldren, S.P. DenBaars, and T. Sota, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2006 (1998).
- T. Wang, D. Nakagawa, J. Wang, T. Sugahara, and S. Sakai, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3571 (1998).
- Y. Narukawa, Y. Kawakami, S. Fujita, and S. Nakamura, *Phys. Rev. B* **55**, R1938 (1997).
- M. Smith, G.D. Chen, J.Y. Lin, H.X. Jiang, M.A. Khan, and Q. Chen, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2837 (1996).
- R.W. Martin, P.G. Middleton, K.P. O'Donnell, and W. Van der Stricht, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 263 (1999).
- K.P. O'Donnell, R.W. Martin, and P.G. Middleton, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 237 (1999).
- S. Chichibu, T. Sota, K. Wada, and S. Nakamura, *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 2204 (1998).
- H.C. Yang, P.F. Kuo, T.Y. Lin, Y.F. Chen, K.H. Chen, L. C. Chen, and J.-I. Chyi, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3712 (2000).
- C.-C. Chuo, C.-M. Lee, T.-E. Nee, and J.-I. Chyi, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3902 (2000).
- G. Popovici, H. Morkoc, and N. Mohammad, in *Group III Nitride Semiconductor Compounds*, ed. B. Gil (Oxford University Press, New York, USA, 1998) p.21.
- K.S. Kim, C.-H. Hong, W.-H. Lee, C.S. Kim, O.H. Cha, G.M. Yang, E.-K. Suh, K.Y. Lim, H.J. Lee, H.K. Cho, J. Y. Lee, and J.M. Seo, *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* **5S1**, W11.74 (2000).
- A. Koukitu, N. Takahashi, T. Taki, and H. Seki, *J. Cryst. Growth* **170**, 206 (1997).
- T. Saito and Y. Arakawa, *Phys. Rev. B* **60**, 1701 (1999).
- M. Tchoukueu, O. Briot, B. Gil, J. Alexis, and R. Anlombard, *J. Appl. Phys.* **80**, 5352 (1996).
- F. Scholz, V. Harle, F. Steuber, H. Boley, A. Dornen, B. Kaufmann, V. Syganow, and A. Hangleiter, *J. Cryst. Growth* **170**, 321 (1997).