

# 분자선에피를 이용한 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 이종접합구조의 성장에 미치는 플라즈마의 영향

심규환

전북대학교 반도체물성연구소 반도체과학기술학과(대학원)  
(논문접수일 : 2005년 1월 18일)

## Plasma Effects on the Growth of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures using Molecular Beam Epitaxy

Kyu-Hwan Shim

403 Semiconductor Physics Research Center, Semiconductor Science Technology Department (Graduate), Chonbuk  
National University, Jeonju 561-765

(Received January 18, 2005)

### 요 약

분자선에피를 이용한  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  이종접합 구조의 에피성장에 미치는 플라즈마의 rf전력의 영향에 대해 고찰하였다. 플라즈마를 발생시키는 rf 전력과 플라즈마 챔버압력의 조건에 따라 성장표면에 도달하는 분자나 원자의 에너지와 flux가 조절되어 에피성장 속도와 물질적 특성을 변화시킨다. 전력이 너무 낮거나 높은 조건에서 표면거칠기와 광특성이 각각 저하된 결과를 보였으며, 적절한 전력인 400 W에서 성장한  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  이종접합 구조에서 날카로운 계면과 강한 photoluminescence 피크를 보였다. 이러한 현상에 대한 원인으로 고에너지 입자들이 성장표면에서 작용하는 기구들인 플라즈마에 의한 탈착과 표면확산, 성장표면의 하부에 주입되는 결함의 발생에 대하여 논하였다.

주제어 : 분자선에피, InGaN, 플라즈마, 에피성장

### Abstract

The influence of plasma parameters on the growth of  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructures has been investigated using plasma-assisted molecular beam epitaxy. Since plasma ejects plenty of energetic particles with different energy levels and flux density at various rf power levels, plasma modulated both growth rate and optical properties significantly. For instance, surface roughness and the emission spectrum of photoluminescence were degraded at low and high rf power. According to sharp interfaces between epitaxial films and strong peaks observed from photoluminescence spectra, our experimental setup presented optimal operation range of rf powers at around 400 W. The phenomena could be explained by the presence of energetic particles modulating the rate of plasma stimulated desorption and surface diffusion, and energetic particles exceeding critical value resulted in the incorporation of defects at subsurface. The optimal rf power regime increased by

100 W for  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  growth in comparison with GaN. The effects of rf power were discussed in conjunction with kinetic processes being stimulated by energetic particles.

**Key Words :** MBE, InGaN, Plasma, Epitaxial Growth

## 1. 서 론

최근 GaN를 기반으로 하는 III-Nitride 화합물반도체의 에피성장은 물론 이를 이용한 전자소자와 광소자의 제작기술이 크게 발전하고 있다 [1-3]. 특히 분자선을 이용한 에피성장법은 저온에서 원자층 수준의 에피층을 성장하는데 매우 유용한 장점을 제공하게 된다. 그러나 질소 플라즈마나 암모니아를 사용하는 GaN계 에피층의 분자선 성장에 있어서 분자나 원자의 입자들이 지닌 에너지와 농도의 분포를 포함하여 플라즈마 파라미터의 불확실성으로 인하여 정확한 성장기구에 대한 해석과 최적의 에피성장에 대한 기술개발을 어렵게 하는 요소로 작용한다. 한편, 수 eV의 kinetic 에너지를 지닌 입자를 이용하여 표면반응의 변조, 격자불일치에 의한 응력의 이완, 섬형성장의 제어에 관하여 수행된 연구들은 고에너지 입자의 유용성과 다양한 응용의 가능성을 보이고 있다 [4,5]. 이와 마찬가지로 분자선 에피성장에 있어서 플라즈마에 의한 영향에 대한 고찰이 필요로 된다.

그러나 분자선에피법을 사용하여 GaN를 비롯한 III-Nitride의 성장에 있어서 플라즈마의 영향에 대한 상세한 연구는 아직 미미하다 [6,7]. 특히 삼원계의 InGaN나 AlGaN의 이종구조를 사용하는 광소자와 전자소자를 개발하는데 있어서, 플라즈마 파라미터와 같은 조건을 최적화 시키는데 있어서 세밀한 표면반응에 대한 연구가 필요로 된다. 즉, GaN를 기반으로 하는 에피성장에 있어서 고에너지 입자에 의한 영향으로 표면개선과 결함발생에 대한 효과에 대한 이해는 에피를 이용하는 소자의 성능을 높이는데 매우 중요한 기초를 제공할 것이다.

본 논문에서는 rf 전력과  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 의 이종접합에서 구조적 특성과 광학적 특성에 대해 고찰하였다. 본 실험결과에 의하면  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  초격자의 광특성에 적합한 성장챔버에서의 가스분압과 rf 전력이 상호작용하는 최적조건이 있으며, 이는 성장

계면에 도달하는 고에너지 입자의 성분이 표면탈착과 확산에 주는 영향과 관련된 것으로 해석된다.

## 2. 실험방법

기존의 MBE시스템에 rf 플라즈마 소스를 부착한 장치를 그림 1과 같이 구성하여 에피성장에 사용하였다 [8,9]. MBE 시스템의 성장챔버에 초고진공을 얻기 위해 터보펌프, 이온펌프, sublimation 펌프를 이용하며, 성장을 시작하기 전에  $2 \times 10^{-10}$  torr의 기본진공을 유지한다. 그리고 rf 플라즈마 소스는 PBN 챔버와 노즐로 제작되었고, rf 유도코일을 통하여 플라즈마를 형성시키며, 외부에 이온의 방향제어를 위한 외부의 전극이 설치되어 있다. 에피성장시에는 터보펌프만 사용하여 플라즈마소스와 성장챔버에서 압력 (P; torr)은 질소가스의 유량( $J_{\text{N}_2}$ ; sccm)에 따라  $P=1.6 \times 10^{-2} J_{\text{N}_2}$  와  $3.8 \times 10^{-5} J_{\text{N}_2}$ 인 상태를 유지한다.

에피성장에 앞서서 사파이어(0001) 기판을 TCE, Acetone, Methanol에서 차례로 degreasing하고, 170 °C의  $3\text{H}_2\text{SO}_4:1\text{H}_3\text{PO}_4$ 에서 15분 식각처리한 다음, 탈이온수로 세척하며, 질소가스로 건조한 다음 Load-lock챔버에 장입한다. 이어서 성장챔버로 사파이어 기판을 이동시킨 후, 기판온도를 900 °C로 올려서 5분간 desorption용 열처리를 하고, 기판의 온도를 500 °C로 다시 낮추어 조절한 후에 20 nm 두께의 AlN 완충층을 성장한다 [9]. 이어서 GaN 에피층을 720 °C 에서 560nm 성장하고  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}(25/50 \text{ \AA})$ 의 초격자층을 670 °C에서 10회 반복적으로 성장하였다.  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  에피층의 임계두께는 Matthew and Blakeslee model 에 의해 7.6 nm로 추정되므로 성장중에 격자불일치에 따른 응력이완 현상은 없을 것으로 본다 [2]. 대체로 성장챔버의 압력이  $7 \times 10^{-5}$  torr에서 에피성장이 이루어졌으며, Langmuir 프로브 방식으로 플라즈마에서 기판으로 공급되는 질소 이온의 평균에너지와 flux를 측정하였다.

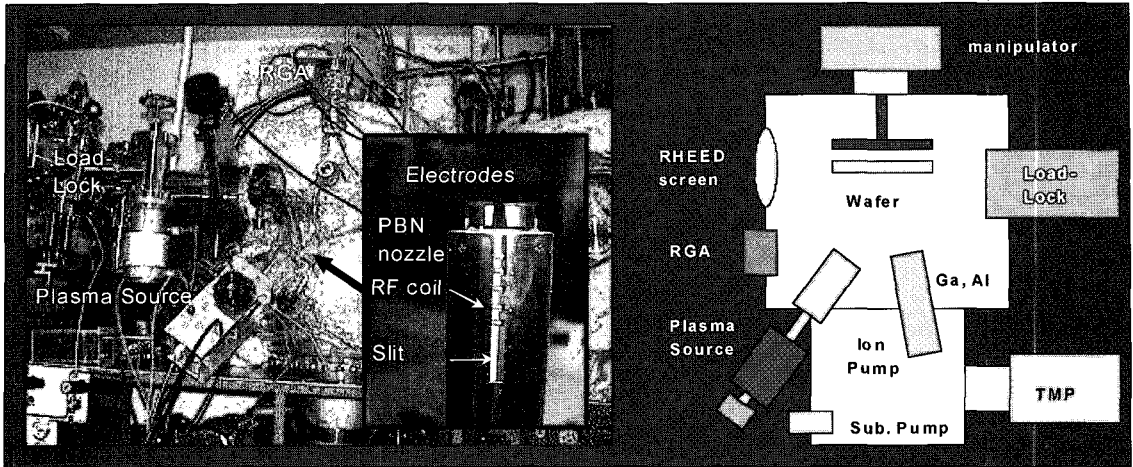


Fig. 1. PAMBE system for the growth of GaN-based nitride semiconductors. Residual gas analyzer, a nitrogen plasma source, and group-III metal sources are attached at the bottom of the growth chamber. The inset shows external view of the rf plasma source equipped with PBN nozzle, rf coil, and a pair of electrodes for the deflection of charged particles.

위와 같이 성장하는 샘플의 표면은 *in-situ* Reflection of High-Energy Electron Diffraction (RHEED)로 관찰하였고, 성장된  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  / GaN 샘플은 Atomic Force Microscopy (AFM), High Resolution X-ray Diffraction (HR-XRD), Cross-sectional Transmission Electron Microscopy (XTEM), Low-temperature Photoluminescence(PL)를 측정하여 성장된 에피층의 구조적 특성과 광특성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

에피성장에 미치는 rf 플라즈마의 영향을 분석하기 위하여, 사용한 플라즈마소스에서 발생된 이온의 에너지와 flux를 다양한 질소가스의 유량과 rf 전력에 대해 측정하였다. 질소가스의 유량이 1 sccm 인 경우 rf 전력을 200, 300, 400, 500 W로 높임에 따라 플라즈마에 존재하는 charged particle의 평균 에너지는 6, 9, 13, 26 eV로 증가하고 flux도 역시 6x, 9x, 14x, 19x  $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 으로 3~4배씩 증가하였다. 이렇게 rf 전력( $P_{rf}$ )과 질소가스의 유량에 따라 좁은 영역에서  $P_{rf}/J_{N_2}$ 에 비례하는 특성은 플라즈마의 밀도와 플라즈마 포텐셜의 증가에 따르는 기본적인 특성으로 이해된다. 그리고  $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 에 해당하는 이온의 flux는 성장속도의 측면에서 MBE

의 에피성장 조건에 적합한 영역으로 동작함을 알 수 있다.

그림 2는 rf 전력을 100 W에서 500 W로 높이면 GaN와  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 을 성장하여 rms 표면거칠기와 성장속도를 측정한 결과로서 rf 플라즈마를 사용하는 분자선 에피의 전형적인 성장특성을 보이고 있다. GaN와  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 에피성장에 있어서 300~400 W에서 최대의 성장속도를 보이고, 그 보다 높은 전력과 낮은 전력에서 모두 감소하였다. 그리고

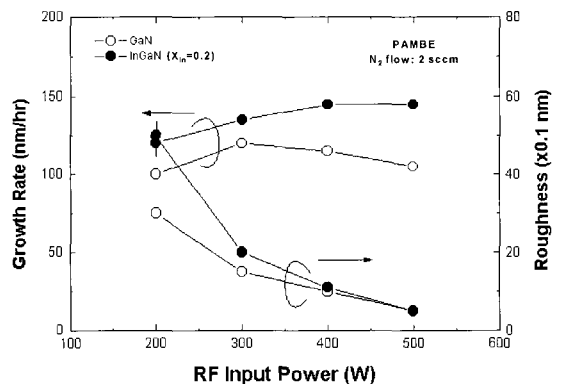


Fig. 2. Growth rate and rms roughness data are shown as a function of the rf input power for GaN and  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ , respectively, as plotted in open and closed circles.

rf 전력이 증가하면서 rms 거칠기는 지속적으로 감소하여 3~5 nm에서 시작하여 0.8 nm 이하로 변화하였다. 이러한 rms 거칠기의 변화는 에피성장하는 동안에 *in-situ* RHEED을 이용한 관찰결과와 일치한다. 즉, 표면이 평탄한 샘플은 [11-20] 방향의 RHEED패턴에서 선형의 날카로운 피크를 나타내며, rms 거칠기가 큰 샘플은 RHEED 이미지가 spotty하면서 희미해진다. 특히 위의 샘플 중에서 200W에서 성장된  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 성장속도는 145 nm/hr 이지만, 순수한 GaN에 비해 4배 정도로 rms 거칠기가 크게 측정되었다.

그리고 상기의 성장조건에서 rf 전력이 300~500 W로 성장된 샘플에서 XRD 피크는 날카롭게 측정된다. 즉 전력이 높은 300~500 W 경우 삼차원 결정성장 모드가 급감하면서 XRD 스펙트럼으로는 결정성이 우수한 에피층이 성장된다. 이러한 결과는 높은 rf 전력에 존재하는 다량의 반응성 질소입자의 공급과 더불어 고에너지 입자가 성장계면에서 이차원의 preferential 성장이 되도록 영향을 미치는 것으로 이해된다. 그러나 원자수준의 결함으로 vacancy나 interstitial 들이 다량 존재하게 되면, 표면이 더욱 평탄하여 구조적인 특성이 우수해도 광특성은 당연히 저하될 것이다. 따라서 표면의 거칠기와 함께 PL과 같은 광특성이 비교되어야 광소자의 제작에 적합한 에피의 품질인지가 결정된다.

한편 표면에서 성장속도가 높은  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 경우 In과 Ga의 원자밀도가 높은 반면에 N 원자가 충분히 공급되지 못하여 거칠고 질소가 부족하여 vacancy와 같은 결정결함을 많이 내포한 박막이 성장되는 것으로 판단된다. 그림 2에서  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 경우 GaN에 비하여 저전력에서 더 거칠은 표면을 보이거나, 100 W 가량 높은 전력에서 성장속도의 피크를 보이는 특성은 In이 부가적으로 첨부된 효과임을 상술된 현상과 관련되는 것으로 판단된다.

그림 3의 (a)와 (b)는 400W에서 성장된 샘플의 저배율과 고배율 XTEM 이미지이며, 사파이어와 AlN 완충층과  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  초격자를 보여준다. 복잡하게 얽혀서 상부로 전파되는 threading dislocations (TDs)과 역피라미드 형태의 V형 결함이 표면에 다량 존재한다. TDs의 Burger's vector는  $g=\langle 11-20 \rangle/3$  이고, 면밀도는 GaN/AlN의 계면에서  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  존재하다가, 표면부위로 가면서 전파되는 전위의 수가 격감하여 0.4~1 μm에서  $\sim 7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 의 낮은 전위밀도를 보인다. 아직은 이차원의 결정결함이 많이 내포되어 성장되어 완벽하게 단결정인 에피성장을 위한 기술개발의 여지는 많이 남아 있다.

XRD 측정으로 얻은 (0002) Bragg피크를 분석한 결과 GaN의 격자상수는 벌크 GaN의 격자상수  $c=5.183 \text{ \AA}$ 에 일치하는 값을 보였고,  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 격자는 1.5% 가량 압축응력을 받는 상태로 분석되

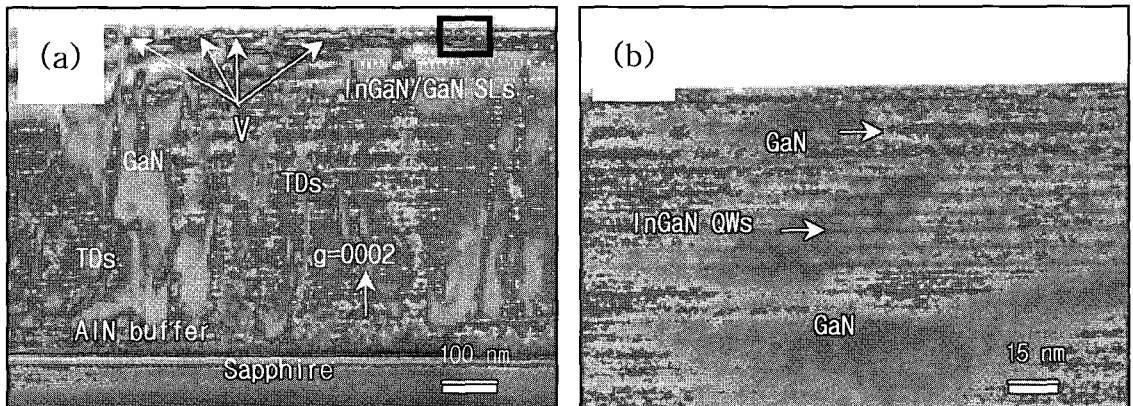


Fig. 3. (a) XTEM [11-20] images of InGaN/GaN SLs grown on sapphire substrates and (b) HR-XTEM image of the rectangle in (a). The micrographs were taken with  $g=0002$  along [11-20] zone axis of hexagonal GaN. HR-XTEM image in (b) shows the sharp interface of InGaN/GaN with on dislocations newly generated due to the relaxation of lattice mismatch stress.

어, 본래  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 가 지니는 2% 차이중에서 0.5%는 이완된 상태로 성장되었다. 고배율 TEM 분석에 따르면  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 과 GaN의 계면에서 새로운 전위가 발생되지는 않았으며, 앞에서 임계두께로 예상된 바와 같이  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 의 응력이 일부 이완된 상태로 평형을 유지하는 성장이 되었음을 알 수 있었다.

한편, 이온의 충돌에 따라 발생하는 여러 종류의 프로세스 중에서 본 실험인 MBE에피성장인 경우는 이온에너지와 flux가 표면탈착과 무반응의 사이에 존재하는 것으로 판단된다 [10,11]. 그림 2에서 인듐이 첨가되면서 성장속도가 증가하고, 동시에 표면거칠기도 증가한 것은 표면에서 In의 밀도와 확산에 따르는 효과임을 보인다. 즉, 부가되는 인듐의 물분율에 따라 평탄한 표면반응으로 유도하기 위해서는 플라즈마소스의 동작조건도 미세하게 변경되어야 한다.

각각 다른 rf 전력의 조건으로 성장된  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  SLs의 광특성을 13 K의 저온에서 PL로 분석한 결과는 그림 4와 같다. PL 스펙트럼이 340~500 nm의 파장영역에서 측정되었고, GaN 피크는 3.464~3.468 eV에서 위치한 반면, 첨부된 작은 그래프에서와 같이  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 과 관련한  $E_1$ ,  $E_2$  피크의 위치와 강도는 샘플별로 큰 차이를 보여준다. 샘플 a,

b, c에서  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}$  NSLs의 band-edge에서 재결합하는 피크인  $E_1$ 과  $E_2$ 의 에너지 준위는 2.61, 2.63, 2.69 eV와 2.72, 2.77, 2.81 eV로 각각 증가한다 [13].

스펙트럼 중에서 400 W에서 성장된 c는  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  피크를 2.81 eV의 높은 에너지에서 강하게 나타냈으며, GaN 300 W에서 가장 강한 피크를 보였다 [6]. 밴드의 가장자리가 순수한 샘플에서 전자와 정공의 재결합에너지 레벨이 높게 나타나는 것으로 보아, 상기의 성장조건 중에서 200 W와 500 W의 조건에서는 피크가 심하게 degrade되고, 최적의 플라즈마가 400 W 부근임을 보였다.

또한, 샘플 c에서 고배율 XRD 스펙트럼은 GaN (0002) 피크의 반치폭을 48 arcsec으로 매우 작은 값을 보였으며,  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  초격자에 해당하는 위성피크에서 75 Å으로 설계된 초격자구조와 TEM 이미지는 일치하였다. 따라서 샘플c의  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  에피는 구조, 계면, 광학특성면에서 최적의 결과를 보였다.

상술된 바와 같이 결정구조만으로 판단한다면 rms 거칠기가 최소로 되는 500 W 이상을 사용해야 하겠지만, 광특성도 포함시켜서 고려하면, rf 전력이 300 W와 400 W의 사이에서 GaN이나  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  에피층 성장에 최적의 조건이 존재함을 알 수 있다. 이온의 탄성충돌로 표면원자를 떼어내는데 필요한 대략적인 에너지는 AlN, GaN, InN에 대하여 각각 16.5, 15, 17 eV로 예상된다 [8]. Boltzman 분포 간주하여 반치폭이 ~5 eV이면, GaN의 성장에 평균에너지는 ~12 eV 이내에서 결합생성이 무시할 만 할 것이다. 이러한 이온에너지는 Langmuir probe로 측정된 바와 같이 플라즈마 소스에서 1~2 sccm, 300~400 W의 동작조건에 해당된다. 그러나 400 W에서 500 W로 변화하면 이온의 평균에너지는 ~21 eV으로 증가한다. 이는 500 W에서 성장된 샘플에서 PL 피크의 에너지 위치와 강도가 크게 감소하는 결과와 결합생성에 의한 효과로 판단하는 근거를 제공한다.

한편, 표면에서 핵생성은 effusion 소스로부터 공급되어 웨이퍼의 표면에 도달하는 원자의 flux와 표면확산으로 도달하는 원자의 flux에 비례하게 되어 있다. 그러나 임계크기를 넘어서려는 핵에서 열에 의한 탈착과 플라즈마에서 공급된 고에너지 입

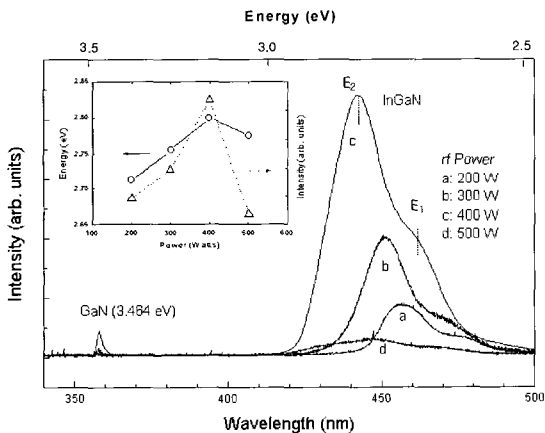


Fig. 4. LT-PL spectra measured at 13 K from InGaN/GaN superlattice samples grown with the rf input powers of 200, 300, 400, and 500 W. The inset shows the evolution of the energy level and intensity of  $E_2$  peaks.

자의 충돌에 따른 탈착은 역반응으로 작용하게 된다. 즉, 이온의 에너지( $E_i$ )와 flux( $J_i$ )의 플라즈마 동작조건을 적용하는 경우

$$r = n_a(1/\tau_{th} + BE_i J_i)$$

로 탈착이 이온에너지에 의해 가속된다. 단, 여기에서  $n_a$ 는 부착된 원자수,  $\tau_{th}$ 는 열에너지에 따른 평균적인 잔류시간, 그리고  $B$  ( $=4.4 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{V}$  for GaN)는 단위이온당 desorption 수율에 해당하는 상수이다 [14]. 따라서 열에너지에 의한 탈착보다 플라즈마의 영향이 커지는 조건으로 GaN의 경우  $720^\circ\text{C}$ 에서 성장하면  $E_i J_i > 3 \times 10^{13} \text{ eV cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 이 되며, 플라즈마 소스로 보자면 대체로  $300\sim 400 \text{ W}$ 의 동작조건에 해당한다.

이상의  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  이종접합의 에피성장과 플라즈마 특성에 대한 고찰로부터 매우 중요한 rf 전력의 영향을 알 수 있었다. 성장되는 에피층에 결함의 주입을 방지하기 위해서  $15 \text{ eV}$  이하의 평균에너지를 지닌 이온을 공급하도록 플라즈마 소스를 동작시켜야 한다. 본 실험에 사용된 플라즈마소스의 경우  $1\sim 2 \text{ sccm}$ 의 질소가스 유량과  $300\sim 400 \text{ W}$ 의 rf 전력이 이에 해당하는 영역으로 나타났다. 그리고 미미한 차이이지만 In이 첨가되면서 표면의 증기압이 큰 In의 존재로 인하여  $100 \text{ W}$ 가량은 GaN의 성장에 비해 높은 rf 전력을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 특히, rf 전력이  $500 \text{ W}$  이상으로 높아지면 이온의 에너지와 flux가 증가하면서 플라즈마에 의한 탈착과 결함의 주입이 심각해짐에 주의를 기울여야 한다. 단, 이러한 문제를 해결하는 방법으로는 에피층을 성장한 후에 고온에서 열처리를 들 수 있다. 고온에서 annealing을 한다면 높은 rf 전력을 사용한 에피성장이 rms 거칠기의 측면에서 유리하므로 상세한 연구가 추가적으로 필요하다.

최근 Ion Beam Assisted Deposition(IBAD)을 이용하여  $100^\circ\text{C}$  이하의 저온에서 금속박막을 유기박막에 적용하는 연구가 증가하고 있다. 즉, 열에 의해 표면에서의 확산이 불가능하여 수 십 내지 수 백eV의 Ar 이온빔을 증착되는 금속박막의 표면에 입사시켜 박막의 밀도를 높임으로서 수분이나 산소

의 침투를 방지하는 효과를 높인다. 이러한 현상은 플라즈마 소스를 사용한 본 실험의 결과에서도 관찰되어 상대적으로 낮은 에너지의 입자임에도 유사한 현상이 존재하는 결과를 보였다.

본 실험에서는  $720^\circ\text{C}$ 의 성장온도,  $2 \text{ sccm}$ 의 질소유량,  $100\sim 500 \text{ W}$ 의 rf 전력이라는 조건에서  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  에피층을 성장하여 구조 및 광특성을 분석한 결과이다. 주의할 점은 상술된 바와 같이 에피층의 GaN, InGaN과 같이 물질의 성분변화에 따라 최적의 플라즈마 동작조건이 미세한 범위에서 변화한다. 따라서 본 연구결과는 GaN는 물론 InGaN, AlGaN 과 같은 Group III-nitride 박막을 분자선에피로 성장하는데 있어서 민감하게 작용하는 표면반응의 제어에 대한 이해에 유용한 결과로 사료된다.

#### 4. 결 론

$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  이종접합구조를 분자선에피법으로 성장하는데 있어서 rf 전력의 영향을 에피층의 구조적 광학적 특성과 상관관계를 비교하여 연구하였다. 플라즈마에서 공급되는 고에너지 입자는 탈착에 영향을 미쳐서  $300\sim 400 \text{ W}$ 에서 성장속도와 광특성이 최적으로 보였다. 특히, rf 전력이  $400 \text{ W}$ 에서 성장한  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  이종접합 구조에서 날카로운 계면과 강한 photoluminescence를 얻었다. 그리고 인듐이 추가되면서 플라즈마의 고에너지 입자들로 인하여 플라즈마에 의한 탈착과 표면 확산, 표면의 하부에 결함이 적은 에피성장의 차이를  $100 \text{ W}$  정도 높이는 효과를 보였다. 단,  $500 \text{ W}$  이상의 고전력은 고에너지 이온으로 인하여 rms 거칠기는 개선되지만 광특성은 심하게 와해되어, 고온의 열처리와 같은 추가적 공정을 요구하게 된다.

#### 감사의 글

“이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-005-C00016)”

#### 참 고 문 헌

[1] M. S. Shur, R. Gaska, A. Khan, and G.

- Simin, Devices, Circuits and Systems, Proceedings of the Fourth IEEE International Caracs Conference, D051-1-D051-8 (2002).
- [2] C. Kim, I. K. Robinson, J. M. Myoung, K. H. Shim, and K. Kim, J. Appl. Phys. **85**, 4040 (1999).
- [3] S. J. Pearton, C. R. Abernathy, B. P. Gila, F. Ren, J. M. Zavada, and S. N. G. Chu, Semiconductor Device Research Symposium, 10-12 Dec. 302 (2003).
- [4] C. J. Tsai, H. A. Atwater, and T. Vreeland, Appl. Phys. Lett. **57**, 2305 (1990).
- [5] A. Barnett, C. H. Choi, and R. Kaspi, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., ISBN 1-55899-133-6, 201 (1991).
- [6] M. S. H. Leung, R. Klockenbrink, C. Kisielowski, H. Fujii, J. Kruger, G. S. Sudkier, A. Anders, Z. Liliental-Weber, M. Rudin, and E.R. Weber, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **449**, 221 (1997).
- [7] H. Fuji, C. Kisielowski, J. Krueger, M. S. Leung, R. Klockenbrink, M. Rubin, and E. R. Weber, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **449**, 227 (1997).
- [8] K. H. Shim, M. C. Paek, K. H. Kim, S. U. Hong, and K. I. Cho, J. Korean Physical Society **34**, S350 (1999).
- [9] S. U. Hong, M. C. Paek, G. P. Han, Y. J. Sohn, T. Y. Kim, K. I. Cho, K. H. Shim, and S. G. Yoon, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 5507 (2002).
- [10] M. V. R. Murty, H. A. Atwater, A. J. Kellock, and J. E. E. Baglin, Appl. Phys. Lett. **62**, 2566 (1993).
- [11] J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, and H. T. G. Hentzell, Appl. Phys. Lett. **43**, 547 (1983).
- [12] A. von Engel, *Electric Plasmas: Their Nature and Uses* (International Publications Service Taylor & Francis Inc., New York, 1983), p.197.
- [13] H. C. Yang, P. F. Kuo, Y. F. Chen, K. H. Chen, L. C. Chen, Jen-Inn Chyi, Appl. Phys. Lett. **76**, 3712 (2000).