

2단계 MOCVD법에 의해 사파이어 기판 위 성장된 undoped GaN 에피박막의 특성에 미치는 고온성장 온도변화의 영향

장경화 · 권명석*† · 조성일

서울시립대학교 화학공학과

*서울시립대학교 신소재공학과

(논문접수일 : 2005년 9월 9일)

Effects of epilayer growth temperature on properties of undoped GaN epilayer on sapphire substrate by two-step MOCVD

K. Chang, M.S. Kwon*†, S.I. Cho

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743 Korea

**Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743 Korea*

(Received September 9, 2005)

요 약

2단계 성장법으로 c-plane 사파이어 단결정 기판 위에 metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD)법으로 undoped GaN 에피층을 성장시켰다. 고온 성장시 성장 온도 변화가 undoped GaN 에피층의 표면형상과 거칠기, 구조적 결정성, 광학적 성질, 전기적 성질에 미치는 영향을 연구하였다. 수평형 MOCVD 장치를 이용해 압력 300 Torr 저압에서 성장시켰으며, 저온 핵생성층 성장조건은 500°C로 고정시키고, 2단계 성장 온도를 850 ~ 1050°C 범위로 변화시켰다. 형성된 undoped GaN 에피층을 원자력현미경, 고분해능 X-선회절장치, 광발광측정, 홀 효과 측정 장치 등을 이용하여 분석, 고찰하였다.

주제어 : GaN, MOCVD, 사파이어기판, 성장온도

Abstract

Undoped GaN epitaxial layer was grown on c-plane sapphire substrate by a two-step growth with metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD). We have investigated the effects of the variation of final growth temperature on surface morphology, roughness, crystal quality, optical property, and electrical property. In a horizontal MOCVD reactor, the film was grown at 300 Torr low-pressure with a fixed nucleation temperature of 500°C, varying the final growth temperature from 850°C to 1050°C. The undoped GaN epilayers were characterized by atomic force microscopy, high-resolution x-ray diffractometer, photoluminescence, and Hall effect measurement.

Key Words : metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD), GaN, sapphire, growth temperature

1. 서 론

질화갈륨(Gallium nitride, GaN)은 상온에서 3.4 eV의 금지대간격(bandgap)을 갖는 직접 천이형 화합물 반도체이다. 또한 금지대간격(bandgap)이 각각 1.9 eV, 6.3 eV 인 InN, AlN와 연속적인 고용체를 형성하여 조성에 따라 발광파장을 조절할 수 있고, 기계적 강도가 우수하며 화학적으로 안정한 장점이 있다. 따라서, 청색 및 자외선 영역의 발광다이오드(light emitting diode, LED)와 레이저다이오드(laser diode, LD) 소자 및 고온 파워 소자로 유망한 반도체 재료이다 [1-4].

GaN 단결정 기판 제조의 어려움 때문에 GaN 에피박막은 동종에피성장(epitaxy)이 아닌 주로 사파이어 기판 위 이종에피성장(heteroepitaxy)을 통해 형성된다. 이때 격자상수 차이와 열팽창계수차에 의해 양질의 GaN 박막을 얻는데 어려움이 따른다. 유기화학기상증착법(metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD) 방법은, 사파이어 기판 위에 완충층으로 AlN [5] 또는 GaN [6]를 핵생성층(완충층)으로 저온에서 증착시키고, 온도를 고온으로 증가시켜 그 위에 GaN 에피층을 고온 성장시키는 2단계 성장으로 GaN 박막의 전기적, 결정학적 성질을 향상시켜왔다.

2단계 MOCVD 성장을 통해 GaN이나 AlN 등의 완충층 위에 undoped GaN 에피층을 고온 성장시킬 때, GaN과 완충층 사이의 계면에너지가 낮아져서 높은 밀도의 GaN 핵이 형성되고 낮아진 계면에너지로 인해 측방향 성장(lateral growth)이 촉진되어 좋은 결정질의 GaN을 얻을 수 있게 된다. 이러한 2단계 성장에서 완충층 형성 온도, 완충층의 두께, III/V 몰비, 완충층 열처리 등이 undoped GaN에 미치는 영향에 대해 많은 결과들이 보고되었다 [7]. 또한 undoped GaN 에피층 고온 성장시 공정 변수에 의한 물성의 변화에 대해서도 연구결과들이 보고되었다 [7-9].

MOCVD 성장의 고온 변화에 관한 이전 연구 결과들은, 600°C 이상의 온도에서는 거의 온도와 증착압력에 무관한 증착 속도 또는 성장 효율을 보여 주었다 [4]. 한편 Keller 등은 1000°C에서 1030°C로 3%만 온도를 상승시켜도 광학적인 면에서 아주 강한 영향을 받는다고 보고하였다 [8].

특히 1000°C 성장온도에서 GaN 에피층을 성장시킬때도 550-600 nm의 yellow luminescence(YL)와, donor- acceptor pair(DAP)에 의한 emission이 강하게 나타나는 것으로 보고하였다 [8]. 본 연구에서는 c-plane 사파이어 단결정 기판 위에 2단계 MOCVD 성장법에 의한 undoped GaN의 에피박막 성장시, 2단계 성장 온도 변화에 따른 GaN 에피층의 변화를 연구하였다. 이전 연구 결과들과 같이 증착을 혹은 광학적 발광 특성 등의 한가지 특성만의 측정이 아니라, 박막의 표면형상과 거칠기, 구조적 결정성, 광학적, 전기적 특성의 변화에 대한 측정을 동일 샘플에 대해 모두 수행하여, 이전의 연구결과들과의 유사점과 차이점 등을 종합적, 체계적으로 연구, 고찰하고자 하였다. 본 연구의 2단계 성장 조건은 950°C 성장 온도에서도 YL이 거의 완전히 억제됨을 보였으며, 이는 Keller 등의 결과 [8]와는 다르다.

2. 실험방법

Undoped GaN 에피층을 사파이어 c-plane 단결정 기판 위에 수평형 MOCVD법에 의해 300 Torr의 저압에서 성장하였다. 모든 성장시 500°C에서 GaN 완충층을 40 nm 두께로 성장시킨 후 고온에서 undoped GaN을 에피성장시키는 2단계 성장을 수행하였다 [9].

반응관은 원통형 석영 외곽 튜브 안쪽으로 직육면체의 석영 inner cell로 이루어졌으며, 이 내부에 SiC로 코팅된 그래파이트 서셉터가 위치해 있어 외곽 튜브 밖에 감겨진 코일을 통한 RF 유도 방식에 의해 서셉터가 가열된다. 서셉터는 공급되는 가스의 흐름이 수평방향으로 흐르게 되어 있으며 고유의 경사도를 지닌다. Ga 소스로는 Trimethylgallium (TMGa)을, N 소스로는 NH₃를 사용하였다. TMGa의 수송가스는 수소(H₂)가스를 사용하였고, 반응은 수소 분위기하에서 진행되었다.

사파이어 기판은 GaN을 성장시키기 전에 아세트산과 메탄올, 초순수를 이용하여 유기물 세척을 하고 N₂ 가스로 기판을 건조시켰다. 그 다음 끓는 H₂SO₄ : H₃PO₄ = 3 : 1의 용액에서 화학적으로 에칭을 하고 초순수에서 overflow 시켰다. 메탄올로

린스를 한 후, 이소프로판알코올(IPA)에서 끓이고 마지막으로 N₂ 가스로 기판에 묻어 있는 용액을 충분히 건조시켰다.

준비된 기판을 반응기에 위치시키고 수소분위기 하에서 1100℃에서 10분동안 열세척을 한 후 500℃까지 온도를 내려 약 30초간 NH₃를 흘려 질화선처리(prenitridation)를 한 후, 40 nm 두께의 GaN 완충층을 성장하였다. 그 다음 온도를 증가시켜 고온에서 undoped GaN 에피층을 20분간 성장시켰으며, 이는 최종 박막 두께 1.3 μm에 해당한다. GaN 완충층 성장과 에피층 성장시 V/III 비는 약 2,740과 1,370으로 고정하였다. 이때 NH₃의 유량은 1 slm으로 하였고, TMGa는 완충층 성장시 7 sccm, 에피층 성장시에는 14 sccm의 유량으로 반응시켰다.

성장된 GaN 박막층의 결정학적인 성장 방향성을 확인하기 위하여 일반 X-선 회절(XRD) 장치를 사용하여, θ -2 θ 스캔 회절 도형을 측정하였다. 성장된 GaN 에피층의 표면 형상과 거칠기는 AFM으로 관찰, 측정하였다. GaN 층의 결정학적 품질을 비교하고자 high-resolution X-ray diffraction (HRXRD)를 이용해 wurzite 구조를 갖는 GaN 에피층의 symmetric (002)와 asymmetric (102) 격자면의 ω 스캔 rocking curve와 반치폭(FWHM)을 측정하였다. GaN 에피층의 광학적 특성을 비교하기 위하여 He-Cd 레이저($\lambda = 325$ nm)를 사용하여 photoluminescence(PL)를 상온에서 측정하였다. 전기적 특성은 van der Pauw technique을 이용한 Hall effect measurement를 BIO-RAD사에서 제작한 HL 5500PC를 사용하여 상온에서 수행하여, 전하운반자농도(carrier density)와 Hall 이동도(mobility)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 c-plane 사파이어 기판 위에 MOCVD 성장된 undoped-GaN 박막의 2단계 고온 성장 온도 변화에 따른 θ -2 θ XRD 회절 도형 결과이다. 사파이어 기판 위 2단계 성장법에 의한 MOCVD 성장시, 2단계 성장온도 850℃~1050℃ 범위에서 모두 단일한 (002) 성장방향만을 가지는 GaN 에

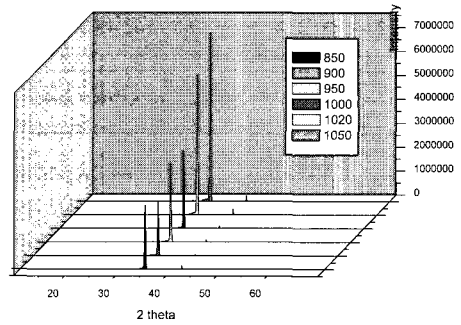


Fig. 1. Conventional θ -2 θ XRD patterns of undoped GaN/sapphire substrate as a function of growth temperature after a fixed low-temperature(500℃) nucleation.

피박막으로 성장함을 관찰할 수 있었다. 즉, 사파이어 기판 위 단일한 (002) GaN 성장 방향만을 위해서 850℃ 성장도 가능함을 보여주었다.

Fig. 2는 Fig. 1의 결과를 보여주는 GaN 에피박막의 각 성장온도에 따른 표면 형상을 보여주는 AFM 2차원 이미지이다. 850℃와 900℃의 성장 온도에서는 고온 핵생성 island가 독립적으로 형성된 형태를 잘 관찰할 수 있으며, 950℃에서는 이러한 island들간의 coalescence 결과에 의한 이미지를 관찰할 수 있다. 본 실험 조건에서 보이는 고온생성 island의 형태는 2차원, 3차원 AFM 이미지들을 종합해보면, 끝이 뾰족한 hillock 형의 형태보다는 flat-top shaped 형태와 유사하였다.

이에 비해 1000℃, 1020℃, 1050℃ 등의 성장 결과는 동일 성장 시간임에도 불구하고 표면 형상이 다른 양상을 보여 주는데, 이는 Fig. 3의 표면 거칠기(rms roughness) 수치의 변화 결과를 함께 고려하면, 동일 성장 시간에서 1000℃ 이상의 고온 성장시 표면 거칠기가 극적으로 감소하는 결과를 반영한다. 이는 고온 영역에서 연속적인 3차원으로 고립된 핵생성과 성장이 효과적으로 억제됨을 암시하는 것으로 판단된다. 또는 성장 온도가 증가할수록 측면성장(lateral growth) 속도가 효과적으로 증가하여 island의 합체(coalescence)가 조기에 발생하고, 고온에서의 향상된 원자 이동도에 힘입어 이후 성장과정에서 준 2차원적 성장이 효율적이라고 할 수 있다. 이전 연구결과에 의하

2단계 MOCVD법에 의해 사파이어 기판 위 성장된 undoped GaN 에피박막의 특성에 미치는 고온성장 온도변화의 영향

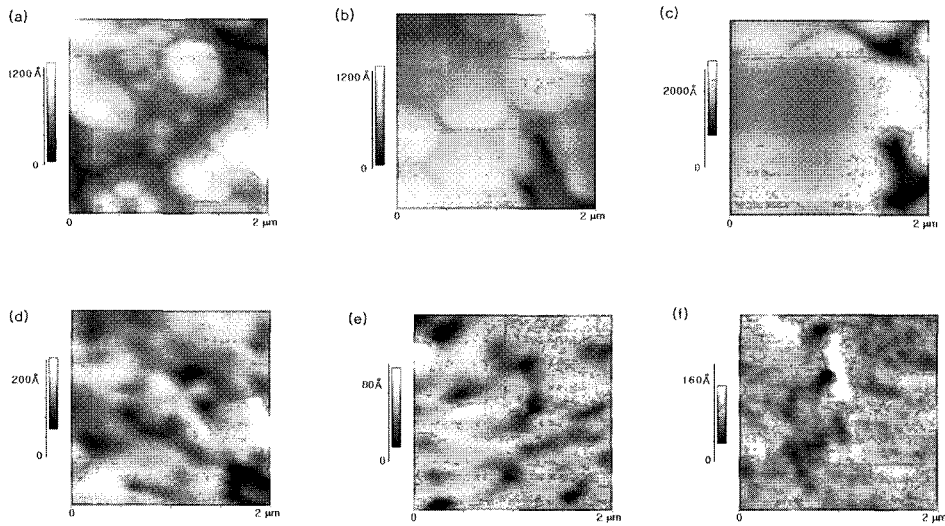


Fig. 2. AFM images of undoped GaN surfaces as a function of growth temperature. (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C, (e) 1020°C, (f) 1050°C.

면, GaN 에피박막층의 수직방향 증착속도는 일정 온도(850°C)이상의 온도에서는 성장온도 증가나 압력변화에 무관함을 보였다 [4].

이에 비해 850°C~950°C 온도 범위에서는 온도가 증가할 때, 표면 rms roughness가 20 nm에서 60 nm로 증가하는 경향을 보였으며, 3차원 AFM 이미지 확인에서도 불균일한 표면 형상을 보였다. 본 실험의 전체 온도 범위에서는 950°C 성장 온도에서 표면 거칠기 rms roughness 수치가 60 nm로 최대값을 보였으며, 이후 극적인 감소를 보여 1020°C에서 최소치 1.6 nm의 rms roughness 값을 보였다.

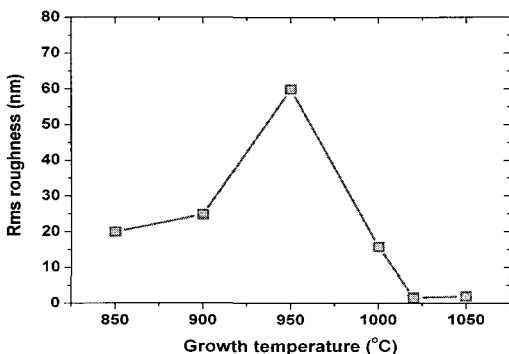


Fig. 3. Measured RMS roughness of undoped GaN surface as a function of growth temperature.

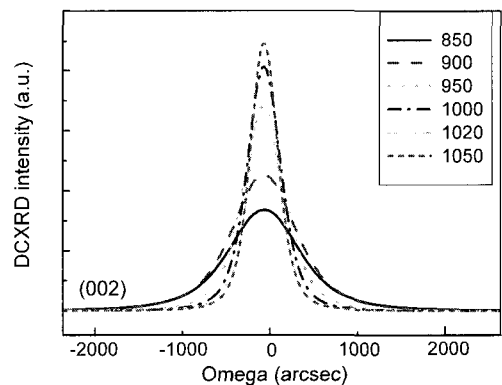


Fig. 4. Symmetric (002) ω scan rocking curves of undoped GaN epilayers by high-resolution XRD.

Fig. 4는 성장된 GaN 에피박막의 (002) 격자면에 대하여, HRXRD를 이용하여 symmetric ω 스캔 rocking curve를 측정된 결과이다. 성장온도가 증가할수록 rocking curve의 형태가 sharp해지며, 반치폭(FWHM)이 감소하는 결과를 보였다. 반치폭의 최소값은 성장온도 1050°C에서 362 arcsec였다.

Symmetric (002) ω 스캔 rocking curve는 GaN 에피박막구조의 tilt 모자이크에 대한 정보를 제공하며, 나사(screw) 관통전위와 mixed 관통전위에

의해 반치폭이 넓어지며, 따라서 순수(pure) 칼날(edge) 관통 전위에 대해서는 영향받지 않는 것으로 알려져 있다 [10]. 그러나, 실제로 사파이어 c-plane 위에 MOCVD 성장시킨 GaN 에피박막의 경우, edge 관통 전위가 지배적이라고 이전 연구 결과에서 알려져 있기 때문에 [10,11], 본 실험에서는 칼날전위와 twist 모자이크에 대한 정보를 주는 것으로 알려져있는 asymmetric (102) 로킹 커브도 측정하였다.

Fig. 5는 asymmetric (102) 격자면에 대한 ω 스캔 rocking curve의 측정 결과이다. 앞서의 symmetric (002) 격자면과 유사하게 성장온도가 증가할수록 rocking curve의 형태가 sharp해지며, 반치폭이 감소하는 결과를 보였다. (102) 반치폭의 최소값은 성장온도 1050°C에서 514 arcsec였다.

symmetric (002) 와 asymmetric (102) 로킹 커브의 반치폭은 성장 온도가 증가할 때 모두 단조 감소하는 경향을 보였다. Fig. 4와 Fig. 5를 종합하면, 성장 온도가 증가할수록, 형성된 GaN 에피박막의 결정 품위는 screw 관통전위, 혼합관통전위, edge 관통전위 측면에서 모두 향상됨을 보였다.

Fig. 6은 성장 온도 변화에 의한 undoped GaN 에피층의 상온 PL 특성 결과이다. 850°C와 900°C 성장온도시에는 약 2.2 eV 근처에서 deep defect에 기인하는 yellow luminescence(YL)가 폭 넓게 나타났다. 성장온도 950°C 이상에서 이러한 yellow luminescence는 거의 사라졌으며, band edge emis-

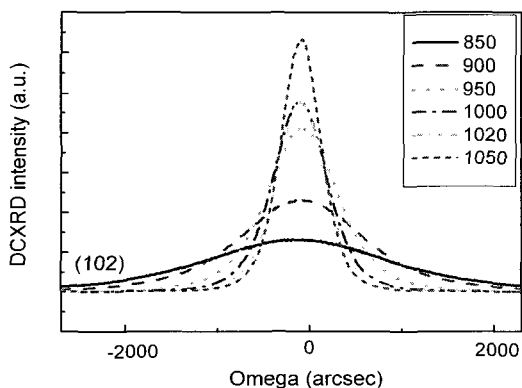


Fig. 5. Asymmetric (102) ω scan rocking curves of undoped GaN epilayers by high-resolution XRD.

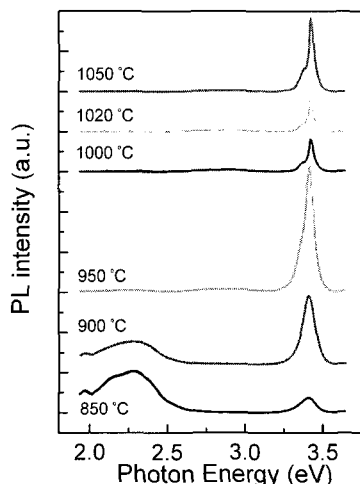


Fig. 6. Room-temperature PL spectra of undoped GaN epilayers.

sion에 의한 main 발광 피크가 지배적이며, 반치폭 최소치는 상온에서 46 meV였다. 이 수치는 Keller 등의 이전 결과와 유사하다 [8]. Keller 등의 온도에 따른 이전 연구결과 [8]는 상온 PL과 22K 저온 PL에서 1050°C 까지도 YL이 band edge emission 보다 크게 나타났으며, 22K 저온 PL에서도 1000°C에서 DAP(donor acceptor pair)가 band edge emission과 비슷한 강도로 측정되었다. 광학적 품질(quality)에 대해, 1000°C 이상에서 30°C 변화함에 따라 크게 영향받는다고 하였다. Yellow luminescence(550 nm-600 nm)는 성장온도에 매우 민감하며, 성장온도가 더 낮아질 경우 donor-acceptor pair line 또한 22K 저온 PL에서 또한 일어남을 보고하였다. 이러한 것들은 성장온도가 낮아짐에 따라 결정 결함들이 생성되어 불순물들의 박막내 함유 확률을 증가시켜 주는 것을 의미할 수 있다.

이전 연구결과들은 YL의 근원으로 결정 입자(grain)내의 확장된 결함(extended defects), carbon과 Ga 공공(vacancy) 등의 복합체(complex), N anitiseite(N_{Ga}), Ga 공공과 oxygen 같은 도우너 불순물과의 복합체 등을 제안하고 있으며, deep acceptor와 free 혹은 매우 약하게 구속된 전자들 사이의 천이에 관계있다고 알려져 있다 [2,12]. 그리고, 실험적으로는 YL band 와 band-edge 발광 강

도의 비가 종종 GaN layer의 품위를 비교하는데 사용되기도 하였으며 YL 발광 강도가 거의 없을 경우가 우수한 에피층 품위임을 보고하였다 [8,13]. 이에 따르면 본 실험의 상온 PL 발광 특성 결과는 950°C 이상의 성장온도에서 YL이 없는 광학적으로 우수한 에피층이 얻어짐을 보여주었다. 이는 앞서의 (002), (102) 로킹 커브 결과와 비교하면, 고온에서의 우수한 결정 품위에 기인하는 것으로 사료된다.

그리고, MOCVD 성장 온도가 저온일 경우, 결정학적인 성장방향측면에서는 단일 (002) 성장방향을 얻을 수 있더라도, YL 발광이 크게 발생하여 광학적인 품질에서의 문제점이 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 성장 온도 변화에 따른 undoped GaN carrier 농도와 Hall 이동도 측정 결과이다. 기존에 보고된 바 [3]와 같이 MOCVD 법에 의해 사파이어 기판에 성장시킨 undoped GaN 에피박막은 n형의 전하운반자 특성을 보였다. 본 실험에서 성장 온도가 증가할 때 이러한 내적(intrinsic) n형 전하운반자의 농도가 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 전기적으로 측정되는 n형 전자 도우너의 가장 큰 근원은 MOCVD 시 박막내에 포함되는 산소(O) 불순물에 의한 것으로 알려져 있으며 [4,7], 측정된 전기적 결과는 p형과의 상쇄(compensation)후의 전체(net) 효과로 나타나는 것으로, p형 억셉터의 대표적 근원은 탄소(C) 불순물로 알려져 있다 [4,7].

이에 따르면 Fig. 7의 전자농도의 감소는 성장 온도가 증가할수록 박막 내의 산소 불순물 함유(incorporation) 효율이 감소함에 기인하는 것으로 판단할 수 있으며, 이는 고온에서의 불순물원의 탈착 효과 증대와, 박막의 구조적인 측면에서도 앞서 HRXRD 결과와 같이 관통전위 밀도 감소와 향상된 결정품위, 혹은 잔류압축응력의 증가 등에 기인하는 것으로 사료된다.

한편, Fig. 7의 Hall 이동도(mobility)의 경우, 950°C에서 최소치를 보이며, 더 고온영역에서는 전체적으로 성장온도가 증가할수록 Hall 이동도가 증가하는 경향을 보여주었다.

Hall 이동도가 950°C에서 최소치를 보인점은

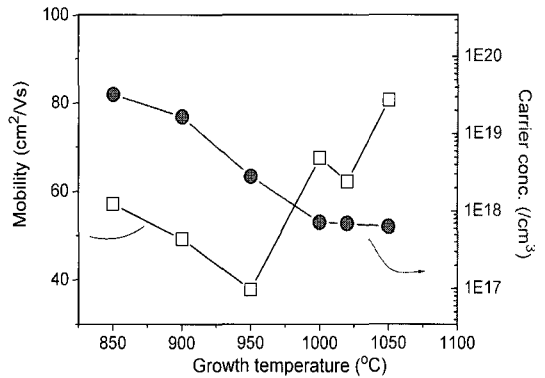


Fig. 7. Hall mobility and background electron concentration as a function of growth temperature.

Fig. 3의 rms roughness 결과에서 표면 거칠기가 수십 nm 수준에서 950°C에서 최대치를 보인 표면 거칠기 결과와 연관성을 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 표면 거칠기가 극적으로 감소한 더 고온영역에서는 이러한 표면거칠기는 영향이 없다고 판단된다.

성장온도 증가에 따른 Hall 이동도 증가 경향은 앞서의 HRXRD 결과와 같이 전위 밀도 감소에 의해 결정성이 향상되는 결과와 산소와 탄소 불순물 함유 확률 감소와 이에따른 compensation 수준(level)의 감소 등에 기인한 산란효과 감소와 관련 있을 것으로 판단된다. 관통 전위의 밀도가 높을 때(10⁹cm⁻²이상), 전하를 띄는 관통전위의 트랩에 의해 주요한 Coulomb scattering 센터로 작용할 수 있다고 제안된 바 있다 [14].

사파이어 기판 위 undoped GaN에피층의 MOCVD 2단계 고온 성장 시 온도가 감소할 때, 표면 거칠기의 극적인 증가와 표면 형상의 변화, 그리고 점 결함과 전위 등의 결정 결함 등의 형성이 두드러짐을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 성장 온도가 에피 박막 층의 특성에 미치는 영향이 결정의 핵 생성, 측면성장, 합체에 기여하는 표면 기구와 불순물 등의 흡착 탈착 효율 변화에 의한 결과로 사료된다. 또한 고온에서 NH₃의 열분해 효율이 높아짐과 이러한 암모니아의 분해가 표면에서 주로 일어나는 기구와도 관련있을것으로 판단되며 향후 추가 연구를 필요로 한다.

4. 결 론

2단계 MOCVD 성장법으로 c-plane 사파이어 단결정 기판 위 undoped GaN 박막을 고온 성장 온도를 변화시키면서 증착시켰다. 성장온도 850 ~ 1050°C 범위 실험 결과, 박막 층의 성장 방향은 온도에 관계없이 (002) 단일 성장 방향을 가지며 에피성장하였다. 표면거칠기는 950°C까지 수십 nm 수준에서 증가후 극적인 감소를 보여, 1020°C에서 최소치 1.6 nm의 rms roughness 값을 보였다. Symmetric (002) 로킹커브와 asymmetric (102) 로킹 커브는 성장온도가 증가함에 따라 반치폭이 단조 감소하여 향상된 결정질과 관통전위밀도감소를 예상하였다. 결함에 의한 YL 발광은 850, 900°C에서 크게 나타났으나, 950°C 이상 성장온도에서는 소멸하였다. Undoped GaN 에피층의 n형 캐리어 농도는 성장온도가 증가할수록 감소하였으며, Hall 이동도는 고온영역에서 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. O. Manasreh and I. T. Ferguson, *III-Nitride Semiconductor Materials: Growth*, (Taylor & Francis, New York, 2003), p. 159, and many references in there.
- [2] A. K. Viswanath, "Luminescence and stimulated emission from wide bandgap semiconductors" in *Handbook of Luminescence, Display Materials, and Devices, vol. 2* edited by H. S. Nalwa and L. S. Rohwer, (American Scientific Publishers, California, 2003), p. 46, and many references in there.
- [3] S. P. DenBaars and S. Keller, "Metalorganic Chemical Vapor Deposition(MOCVD) of Group III Nitrides" in *Gallium Nitride (GaN) I* edited by J. I. Pankove and T. D. Moustakas, (Academic Press, San Diego, 1998), p. 20, and many references in there.
- [4] J. M. Redwing and T. F. Kuech, "MOVPE of GaN and related compounds" in *Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors* edited by J. H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano, and C. Wetzel, (INSPEC, London, 1999), p. 416, and many references in there.
- [5] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 353 (1986).
- [6] S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L170 (1991).
- [7] O. Briot, "MOVPE growth of nitrides" in *Group III Nitride Semiconductor Compounds* edited by B. Gil, (Oxford University Press Inc., New York, 1998), p. 87, and many references in there.
- [8] B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, W.-N. Jiang, Y.-F. Wu, H. Masui, X. Wu, B. Heying, J. S. Speck, U. K. Mishra, and S. P. Denbaars, *J. Electmon. Mat.* **24**, 1707 (1995)
- [9] M. S. Kwon and S. I. Cho, *J. Cryst. Growth* **266**, 43 (2004).
- [10] B. Heying, X. H. Wu, S. Keller, Y. Li, D. Kapolnek, B. P. Keller, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 64 (1996).
- [11] D. Kapolnek, X. H. Wu, B. Heying, S. Keller, B. P. Keller, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1541 (1995).
- [12] M. Leroux and B. Gil, "Luminescence of GaN" in *Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors* edited by J. H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano, and C. Wetzel, (INSPEC, London, 1999), p. 58, and many references in there.
- [13] A. K. Viswanath, J. I. Lee, S. Yu, D. Kim, Y. Choi, and C.-H. Hong, *J. Appl. Phys.* **84**, 384 (1998).
- [14] X. H. Wu, P. Fini, E. J. Tarsa, B. Heying, S. Keller, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *J. Cryst. Growth* **189/190**, 231 (1998).