

MgAl₂O₄ 기판위에 GaN의 HVPE 성장조건에 따른 광루미네선스 특성

김 선 태 · 이 영 주*

대전산업대학교 재료공학과

*광전자 반도체 (주)

Photoluminescence Properties of GaN on MgAl₂O₄ Substrate with HVPE Growth Conditions

S.T. Kim and Y.J. Lee*

Department of Materials Engineering, Taejeon National University of Technology, Taejeon 300-717

*Optel Semiconductor Corp. Iksan 570-210

(1998년 5월 4일 받음, 1998년 5월 18일 최종수정본 받음)

초 록 이 연구에서는 HVPE법으로 MgAl₂O₄ 기판 위에 GaN를 서로 다른 조건에서 성장시키고, 성장된 GaN의 PL 특성을 조사하였다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN는 MgAl₂O₄ 기판으로부터 Mg의 out-diffusion에 의한 auto-doping 효과에 의하여 불순물이 첨가된 GaN의 PL 성질을 나타내었다. Mg과 관련된 발광 강도는 GaN의 성장온도가 증가함에 따라 GaN의 표면에서 Mg의 재증발에 의하여 감소하였으며, GaN의 두께에 대하여 지수 함수적으로 감소하였다. 두 개의 무한 고체 사이에서 농도 차에 의한 확산현상을 고려하여 구한 GaN내에서 Mg 원자의 확산계수는 $D=2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이었다.

Abstract The photoluminescence (PL) characteristics of hydride vapor phase epiaxy (HVPE) grown GaN films on MgAl₂O₄ substrate were investigated with several growth conditions. The GaN films on MgAl₂O₄ substrate is auto-doped with Mg atoms which thermally out-diffused from substrate lead to a PL characteristics of impurity doped ones. The Mg-related emission band intensity decreased with growth temperature may due to the evaporation of Mg atoms at the GaN film surfaces, and it also decreased with GaN film thicknesses. We can estimate the diffusion coefficient of Mg atoms in GaN under the consideration of diffusion phenomena between two infinite solids lead to a value of $D=2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$.

1. 서 론

Ⅲ-V족 질화물 반도체에 대한 오랜 연구의 결과로 GaN/InGaN 이중이종접합구조를 채택한 고휘도 청색 발광다이오드(LED)가 상용화되었으며, InGaN를 활성층으로 사용한 다중양자우물(multi quantum well) 구조의 청색 레이저 다이오드(LD)가 실온에서 연속발진 하는데 성공하였다.¹⁾ 이와 같은 발광소자는 주로 사파이어(Al₂O₃) 기판 위에 MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)법으로 heteroepitaxy 성장하여 제작하고 있다. 사파이어 기판과 GaN 사이의 물리적 성질 차이에 의한 영향을 최소화하기 위하여 AlN 또는 GaN를 완충층으로 사용하고 있지만 성장된 GaN 내부에는 결정결함이 $10^8 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 정도 존재한다.²⁾ 결정결함 발생의 주된 원인은 사파이어 기판과 GaN 사이의 격자상수와 열팽창계수의 차이에 의한 것으로서 발광소자의 동작 특성을 최적화 하는데 장애 요인으로 작용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 GaN와의 격자 부정합도가 적은 산화물 기판을 이용한 heteroepitaxy 성장과^{3~6)} 벌크 GaN 기판을 이용한 homoepitaxy 성장에 관한 연구가 이루어졌다.⁷⁾

스핀넬 구조의 입방정 MgAl₂O₄는 융점이 약 2130℃로 높고, 격자상수는 8.083Å이다. MgAl₂O₄의 (111) 면에서 산

소원자의 사이의 결합길이는 2.86Å으로서 GaN의 (00.1) 면에서 질소원자 사이의 결합 길이 3.16Å와의 유효 격자 부정합도는 9.5% 정도이다.^{3,4)} Kurumata 등³⁾은 MOCVD법으로 사파이어 기판 위에서 성장조건과 동일한 조건에서 고품위의 GaN 박막을 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장하였다. 또한 MgAl₂O₄를 기판으로 사용하여 Yang 등⁵⁾은 발광과장이 385 nm인 LED를 제작하였고, Nakamura 등⁶⁾은 실온에서 410nm의 파장을 펄스 발진하는 LD를 제작하였다.

그러나 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 광학적 성질은 잘 알려져 있지 않고 있으며, 특히 HVPE법에 의한 GaN의 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장도 그다지 많이 연구되지 않았다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN 결정 역시 기판과의 물리적 성질 차이에 의하여 광학적 성질이 영향을 받게 될 것으로 예상된다. 또한 MgAl₂O₄는 1000℃ 이상의 온도, 즉 GaN의 성장온도 부근에서 열적으로 불안정하여 열 분해되면서 다량의 Mg 원자들이 밖으로 확산(out-diffusion)하게 되며, 이로 인하여 기판이 심하게 균열된다.⁸⁾ 이와 같은 현상이 GaN의 성장과정 중에 진행이 된다면 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장되는 GaN 결정 내부에 다량의 Mg 원자들이 재 분포되어 불순물이 첨가되지 않은 GaN와는 다른 광학적 성질을 보이게 될 것이다. Mg는 GaN 내에서 역셉터 불순물로 작용하며, 가전도대 끝단으로부터 약

250meV의 광학적 이온화에너지를 갖으며, 특성 PL 발광 밴드는 2.7eV의 위치에서 관찰된다.^{9,10)}

따라서 이 연구에서는 HVPE법으로 MgAl₂O₄ 기판 위에 GaN를 서로 다른 조건에서 성장시키고, 성장된 GaN의 특성을 조사하였다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN 내에 Mg이 존재하는 것을 SIMS 분석을 통하여 확인하였고, GaN의 성장온도와 성장 시간에 따른 광루미네선스 (photoluminescence ; PL) 특성으로부터 Mg의 out-diffusion과 관련지어 고찰하였다.

2. 실험 방법

GaN의 성장을 위하여 3단 수평형 대기압 HVPE 장치를 사용하였다.¹¹⁾ 두께가 400 μ m, 크기가 5mm \times 5mm 또는 10mm \times 10mm인 (111) MgAl₂O₄ 기판을 유기용매로 초음파 세척한 후 이온정제수로 희석된 HF용액 (H₂O:HF = 10:1)으로 30초 동안 에칭하여 사용하였다. 반응관내에 금속 Ga과 MgAl₂O₄ 기판을 위치시키고 반응관 내부를 10⁻³ torr의 진공으로 배기한 후 3000cc/min으로 N₂가스를 흘리면서 전기로의 온도를 상승시켰다. 30cc/min의 HCl을 300cc/min의 N₂와 함께 금속 Ga 위로 통과시켜 GaCl을 생성하고, MgAl₂O₄ 기판이 놓인 결정성장 영역에서는 300cc/min으로 공급되는 NH₃와 함께 반응하여 GaN가 성장되도록 하였다. Ga의 온도와 기판이 놓이는 부분의 온도는 각각 850 $^{\circ}$ C와 1000~1050 $^{\circ}$ C로 유지하였다. 이와 같은 조건에서 GaN의 성장률은 60 μ m/hr이었다. 결정성장 시간이 경과되면 HCl의 공급을 차단한 후 전기로의 온도가 600 $^{\circ}$ C까지 냉각되는 동안 NH₃를 계속 주입하여 성장된 GaN가 재 분해되는 것을 방지하였다.

성장된 GaN 박막의 두께와 표면상태를 금속현미경으로 조사하였고, 이중결정 X-선회절 (double crystal X-ray diffraction ; DCXRD)장치를 이용하여 결정의 품질을 평가하였다. 광루미네선스 (PL)를 측정하기 위하여 10K의 온도와 살온에서 여기광원으로 발진파장과 출력이 각각 325nm와 13mW인 He-Cd 레이저 빔을 석영렌즈로 집광하여 시료를 여기시켰다. 시료의 표면으로부터 발광되는 빛을 집광하여 초점길이가 0.75m인 분광기로 분광한 후 광증배관으로 검출한 후 data 처리장치를 이용하여 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 1030 $^{\circ}$ C의 온도에서 사파이어 기판과 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장시킨 두께 10 μ m인 GaN 박막의 (00.2) 방향에 대하여 측정된 DCXRD패턴을 비교하여 나타낸 것이다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 DCXRD 피크의 반치폭은 710 arcsec로서 사파이어 기판 위에 성장된 GaN의 반치폭 560 arcsec에 비하여 약 20% 정도 크게 나타났다. 서로 다른 기판 위에 동일한 성장조건에서 성장시킨 GaN의 DCXRD 반치폭이 서로 다르게 나타난 사실로부터 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장시킨 GaN의 결정 품질이 사파이어 기판 위에 성장된 GaN의 결정 품질에 비하여 우수하지 않음을 알 수 있다.

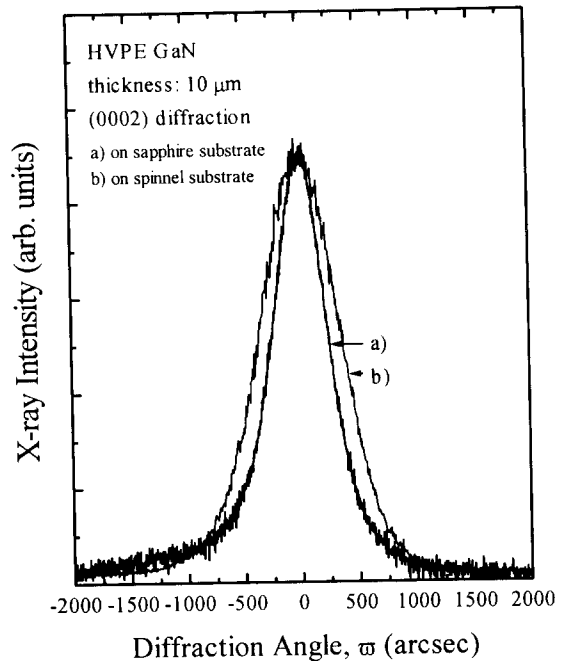


Fig. 1. Double crystal X-ray rocking curves of 10 μ m thickness GaN films on a) Al₂O₃ substrate and b) MgAl₂O₄ substrate, respectively.

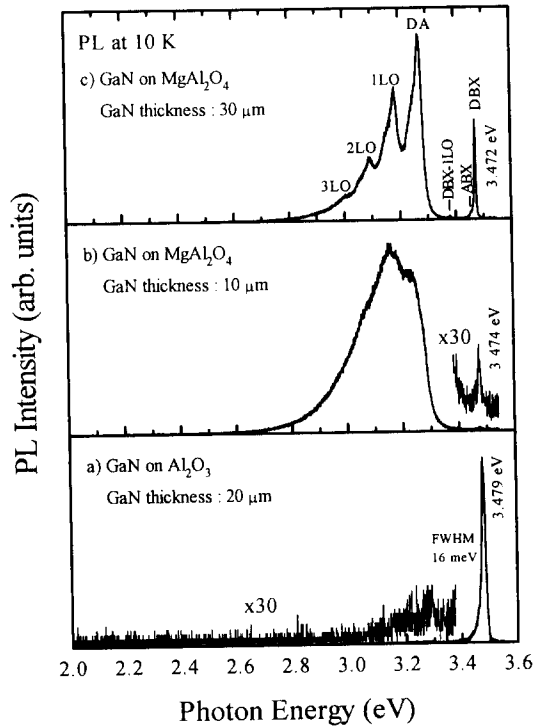


Fig. 2. 10 K photoluminescence spectra of GaN films on a) Al₂O₃ substrate and b, c) MgAl₂O₄ substrate, respectively.

그림 2는 MgAl₂O₄ 기판과 사파이어 기판위에 성장한 GaN에 대하여 10 K의 온도에서 측정된 PL 스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. PL 스펙트럼은 크게 에너지 갭 부근에서 여기자 (exciton)의 소멸에 의한 발광과 얇은 준위의 도너-억셉터 쌍 (donor-acceptor pair ; DAP) 사이의 재결합에 의한 3.26eV 부근의 발광과 DAP의 LO 포

논복제로 구성되었으며, 결정의 결함과 관련하여 2.2eV 부근에서 나타나는 발광은 관찰되지 않았다. 우선 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 PL 스펙트럼은 사파이어 기판 위에 성장된 GaN의 PL 스펙트럼과는 달리 여기자의 소멸에 의한 발광보다 얇은 준위의 DAP에 의한 발광 강도가 크게 나타났다. 이와 같은 PL 스펙트럼은 Si, Cd, Zn 및 Mg 등의 불순물을 고의로 첨가시켜 성장한 GaN의 PL 스펙트럼과 유사하다.^{9,10,12~14} MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 두께 30 μ m인 GaN의 PL 스펙트럼 (그림 1-c)은 3.484eV 부근에서 자유여기자의 소멸에 의한 발광과 3.472eV에서 중성 도너에 구속된 여기자 (DBX)의 소멸에 의하여 반치폭이 약 6meV인 발광 및 3.455eV에서 중성 억셉터에 구속된 여기자 (ABX)와 관련된 발광으로 구성되었다. 한편, 3.272eV에서는 얇은 준위의 DAP 재결합 발광과 92 meV의 간격을 갖는 DAP의 1LO, 2LO 및 3LO 포논복제 (phonon replica)에 의한 발광이 함께 나타났다. 그러나 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 두께 10 μ m인 GaN의 PL 스펙트럼 (그림 1-b)은 3.474eV에서 중성의 도너에 속박된 여기자의 소멸에 의한 관련 발광 강도가 매우 약하였고 잘 분리되지 않았으며, DAP와 DAP의 LO 포논복제에 의한 발광도 잘 분리되지 않았다. 한편, 사파이어 기판 위에 성장된 두께 20 μ m인 GaN의 PL 스펙트럼 (그림 1-a)은 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 PL 스펙트럼과는 달리 여기자 관련 발광 강도에 비하여 얇은 준위의 DAP 재결합에 의한 발광이 매우 작게 나타났다. 이와 같이 사파이어 기판 위에 성장된 GaN과 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 PL 스펙트럼이 현저하게 다른 성질을 보이는 것은 GaN의 성장온도에서 MgAl₂O₄가 열적으로 분해되면서 이동하기 쉬운 Mg이 out-diffusion하여 성장된 GaN 결정 내에 재 분포하여 auto-doping되기 때문이다. 이와 같이 auto-doping된 Mg은 Ga 자리를 치환한 억셉터로서 캐리어의 재결합 중심으로 작용하게 된다. 특히 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN의 두께에 따라 서로 다른 PL 스펙트럼을 보이는 것은 이와 같이 auto-doping된 불순물 농도가 서로 다르기 때문이라 여겨진다. 그림 1-b)와 그림 1-c)에 보인 PL 스펙트럼의 형태를 Mg을 고의로 첨가하여 성장시킨 GaN에 대한 선행 연구자의 결과와 비교하여 보면, 두께가 10 μ m인 GaN의 PL 스펙트럼은 Mg의 첨가량이 $\geq 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 인 경우와 유사하고,⁹ DAP의 LO 포논복제가 잘 분리되는 두께 30 μ m인 GaN의 경우는 Mg의 첨가량이 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 과 유사하다.¹⁵

그림 3은 서로 다른 성장온도에서 MgAl₂O₄ 기판 위에 약 60 μ m의 두께로 성장시킨 GaN에 대하여 실온에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타낸 것이다. 실온에서의 PL 스펙트럼은 3.4eV 부근에서 에너지 밴드 사이의 캐리어 재결합에 의한 발광 (BB)과 3.26eV 부근에서 얇은 준위의 DAP 재결합에 의한 발광 및 GaN에서 억셉터로 작용하는 Mg과 관련된 2.7eV 부근에서의 발광으로 구성되었다. 성장온도 1000 $^{\circ}$ C에서는 BB 발광 강도에 비하여 얇은 준위의 DAP 발광과 Mg과 관련된 발광 피크의 강도가 상대적으로 작게

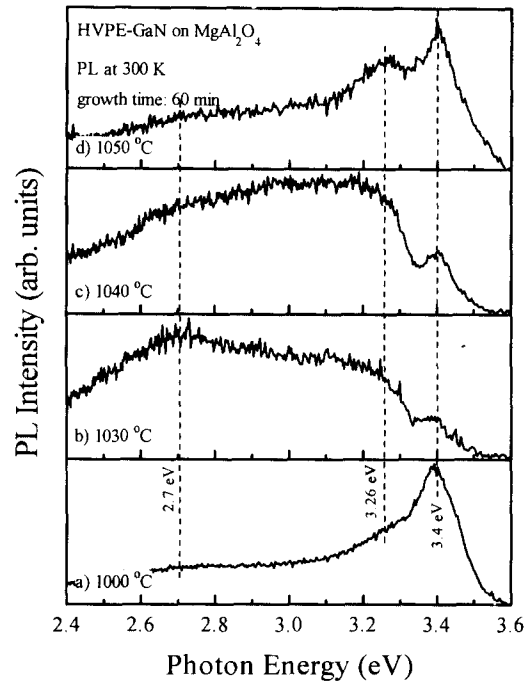


Fig. 3. Room temperature PL spectra of GaN films on MgAl₂O₄ substrate with variation of the GaN growth temperature.

관찰되었다. 그러나 성장온도가 1040 $^{\circ}$ C로 증가함에 따라 불순물들에 의한 발광이 BB 발광에 비하여 큰 신호로 나타났으며, 1050 $^{\circ}$ C에서는 BB 발광에 비하여 불순물들에 의한 발광이 작게 나타났다. 또한 성장온도가 증가함에 따라 Mg과 관련된 발광 강도가 DAP에 의한 발광 강도에 비하여 상대적으로 작게 나타났다. 이는 MgAl₂O₄ 기판으로부터 GaN에 auto-doping된 Mg이 성장온도가 증가함에 따라 GaN 표면에서 재 증발함으로써 얇은 준위를 형성하는 DAP의 농도에 비하여 Mg의 농도가 감소하기 때문이라 여겨진다.

그림 4는 1030 $^{\circ}$ C의 온도에서 성장시킨 서로 다른 두께의 GaN에 대하여 실온에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타낸 것이다. 성장된 GaN의 두께가 증가함에 따라 얇은 준위에 의한 DAP 발광 강도에 비하여 Mg과 관련된 발광 강도가 감소하였으며, BB 발광 강도가 상대적으로 증가하였다. 이것은 GaN의 두께가 증가함에 따라 MgAl₂O₄ 기판으로부터 out-diffusion과정을 거쳐 GaN내에서 이동하는 Mg의 농도가 감소하기 때문에 Mg과 관련된 PL 강도가 감소하게 되며, 아울러 에너지 밴드 사이의 캐리어 재결합이 보다 효율적으로 이루어지기 때문이라 여겨진다.

그림 5는 그림 4에 보인 PL 스펙트럼에서 얇은 준위의 DAP 재결합 발광강도 (I_{DA})와 Mg과 관련된 발광 강도 (I_M)의 비 (I_M/I_{DA})를 GaN의 두께 (x)와 성장시간 (t) 사이의 관계 (x/\sqrt{t})로 나타낸 것이다. Sasaki 등¹⁶은 Mn이 첨가된 GaAs에서 얇은 준위를 형성하는 억셉터와 또 다른 억셉터 밴드를 형성하는 Mn의 상태밀도 함수가 각각의 억셉터 상태의 파동함수에 대하여 공간적으로 확장된다는 가정 아래 PL 스펙트럼의 얇은 준위의 DAP 발광강도 (I_{DA})와 Mn과 관련된 발광 강도 (I_M)의 비 (I_M/I_{DA})를 이용하여

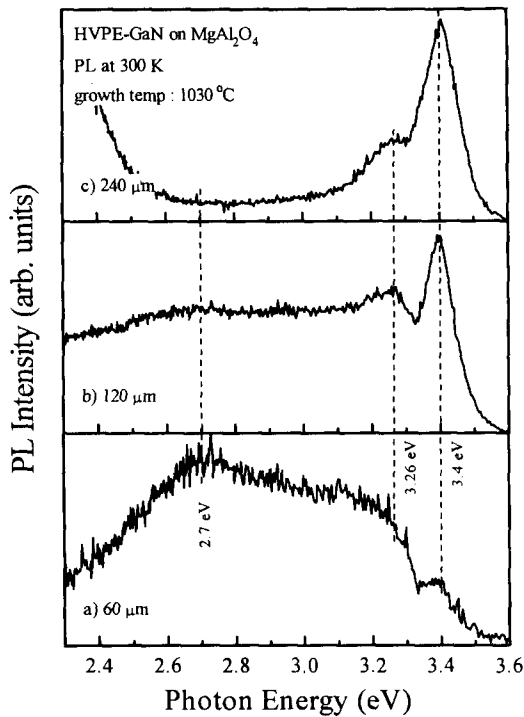


Fig. 4. Room temperature PL spectra of GaN films on MgAl₂O₄ substrate with variation of the GaN film thicknesses.

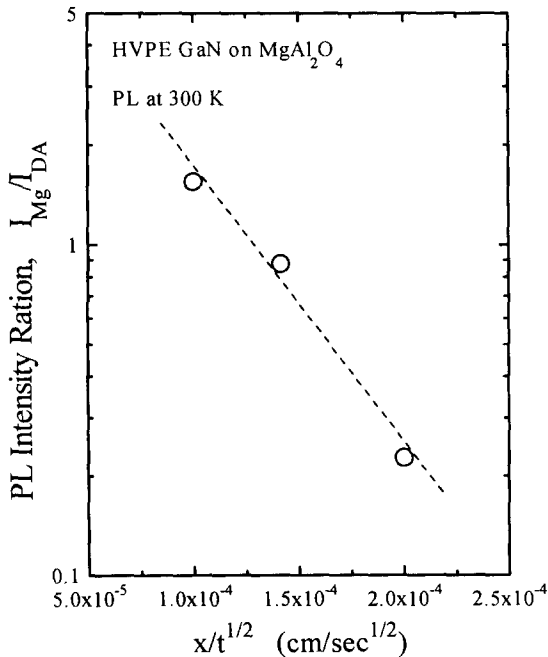


Fig. 5. The relationship between impurity-related PL intensity ratio and x/\sqrt{t} , where x is film thickness and t is growth time.

Mn의 농도를 결정할 수 있음을 보였다. 따라서 그림 5에서 GaN의 두께에 대하여 I_{Mg}/I_{DA} 가 감소하는 것은 Mg의 농도의 감소와 관련이 있는 것으로서 이를 정량적으로 해석하기 위하여 $x=0$ 의 위치에서 접촉을 이루고 있는 두 개의 무한 고체 사이에서 농도 차이에 따른 확산 현상을 고려하였다. 즉 $-\infty < x < 0$ 와 $0 < x < \infty$ 인 두 고체가 $x=0$ 의 위치에서 접촉을 하고 있는 경우, $x < 0$ 인 영역에서 용질원자의 농도

가 $C=C'$ 이고, $x > 0$ 인 영역에서 용질원자의 농도가 $C=0$ 인 경우 확산 방정식은 $C = \frac{1}{2}C' \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ 로 나타내어지며, erfc 함수는 근사적으로 $\operatorname{erfc} Z \cong \frac{1}{\sqrt{\pi}Z} \exp -Z^2$ 로 표현된다.¹⁷⁾ 따라서 불순물과 관련된 PL 발광강도의 비 I_{Mg}/I_{DA} 를 GaN의 두께 (x)와 성장시간 (t)의 비(x/\sqrt{t}) 대하여 나타냄으로써 확산계수 D 를 근사적으로 구할 수 있으며, 그림 5의 기울기로부터 구한 확산계수는 $D = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이었다. 이와 같이 구하여진 확산계수를 GaN내에서 Mg의 확산계수가 알려져 있지 않은 관계로 직접 비교할 수는 없었다. 여하튼 GaN 내에서 Mg의 확산계수와 MgAl₂O₄ 단위정 내의 Mg 원자수를 고려하여 근사적으로 구한 확산 원자의 농도는 GaN 두께가 60 μm일 때 $5.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이었고, 240 μm일 때 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로서 GaN의 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 그림 6은 I_{Mg}/I_{DA} 와 MgAl₂O₄ 기판으로부터 Mg의 out-diffusion을 고려하여 계산한 Mg 농도를 비교하여 나타낸 것이다. I_{Mg}/I_{DA} 와 계산된 Mg의 농도가 선형적인 관계를 보이는 것은 Mn이 첨가된 GaAs에서 얻어진 결과¹⁶⁾와 같은 경향을 보이고 있는 것이다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN내에 존재하고 있는 Mg의 양을 알아보기 위하여 secondary ion mass spectroscopy (SIMS) 분석을 하였다. 그림 7에 보인 것과 같이 GaN의 표면으로부터 약 0.5 μm 깊이까지는 Mg이 pile-up되었지만 그 이하의 깊이에서는 균일한 농도로 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 Mg이 일정량 첨가된 GaN 표준시편이 없는 관계로 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN 내에서 Mg의 양을 정할 수 없었다. 따라서 여기서 기판인 MgAl₂O₄로부터 Mg의 out-diffusion을 가정하여 구

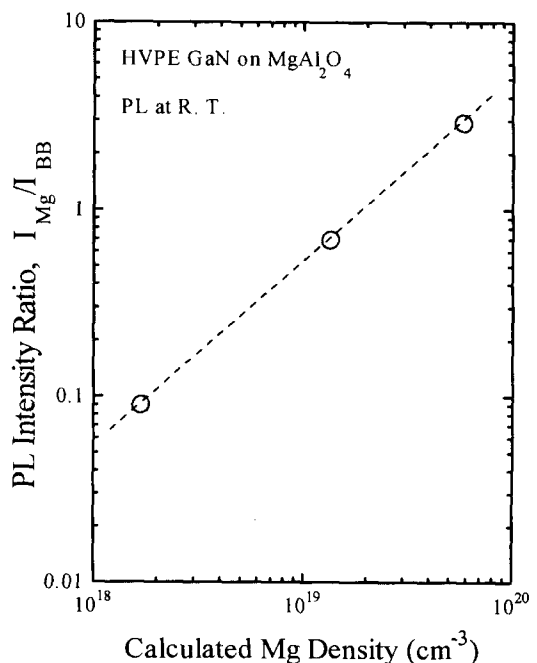


Fig. 6. The relationship between impurity-related PL intensity ratio and calculated Mg atom density.

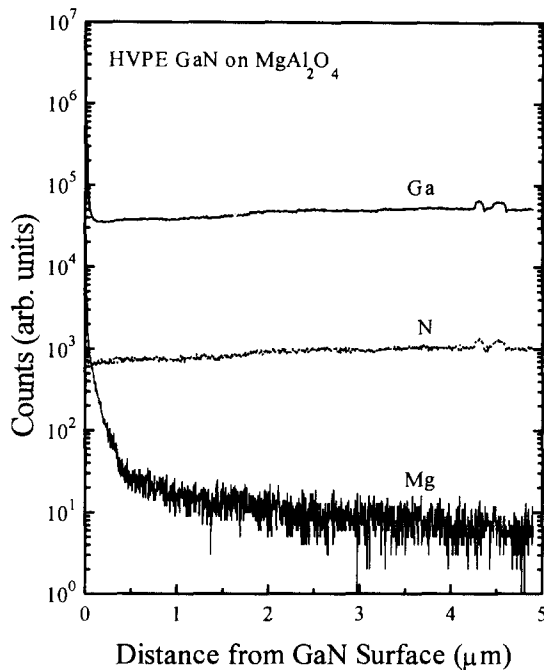


Fig. 7. SIMS profile for the HVPE grown GaN on MgAl₂O₄ substrate.

한 Mg의 농도에 대하여 직접적인 검증을 할 수는 없지만 PL 스펙트럼에서 Mg과 관련된 발광 강도와 계산된 Mg 원자 농도가 선형적인 관계가 있는 것과 SIMS 분석결과로부터 MgAl₂O₄ 기판 위에 성장시킨 GaN는 Mg의 out-diffusion에 의하여 PL 특성이 크게 영향받고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 HVPE법으로 MgAl₂O₄ 기판 위에 GaN를 서로 다른 조건에서 성장시키고, 성장된 GaN의 PL 특성을 조사하였다. MgAl₂O₄ 기판 위에 성장된 GaN는 MgAl₂O₄ 기판으로부터 Mg의 out-diffusion에 의한 auto-doping 효과에 의하여 불순물이 첨가된 GaN의 PL 성질을 나타내었다. Mg과 관련된 발광 강도는 GaN의 성장온도가 증가함에 따라 GaN의 표면에서 Mg의 재증발에 의하여 감소하였으며, GaN의 두께에 대하여 지수 함수적으로 감소하였다. 두 개의 무한 고체 사이에서 농도 차에 의한 확산현상을 고려하여 구한 GaN내에서 Mg 원자의 확산계수는 $D=2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이었다. GaN내에서 Mg의 확산계수를 고려하여 구한 Mg 원자의 농도와 불순물 관련 발광

강도의 비는 선형적인 관계를 나타내었다.

감사의 글

DCXRD와 SIMS 측정에 도움을 주신 LG 종합기술원 김배용 박사와 PL 측정에 도움을 주신 과학기술원 물리학과 박해용 교수님과 이철 군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode*, Springer-Verlag, Berlin (1997).
2. S.D. Lester, F.A. Ponce, M.G. Cradford, and D.A. Steigerwald, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1249 (1996)
3. A. Kuramata, K. Horino, K. Domen, and K. Shinohara, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2521 (1995)
4. C.J. Sun, J.W. Yang, Q. Chen, M.A. Khan, T. George, P.C. Chien, and S. Mahajan, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1129 (1996).
5. J.W. Yang, Q. Chen, C.J. Sun, B. Lim, M.Z. Anwar, and M.A. Khan, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 369 (1996)
6. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3269 (1996)
7. S. Porowski, *Materials Sci. Eng. B*, **44**, 407 (1997).
8. J.M. Green, *J. Electrochem Soc.* **119**, 1765 (1972).
9. H. Amano, M. Kitho, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, *J. Electrochem. Soc.* **137**, 1639 (1990).
10. J.A. Pankove and J.A. Hutchby, *J. Appl. Phys.* **42**, 5387 (1976).
11. 김선태, 문동찬, 홍창희, *한국재료학회지* **6**, 457 (1996)
12. M.R.H. Khan, Y. Ohshita, N. Sawaki, and I. Akasaki, *Solid State Commun.* **57**, 405 (1986).
13. O. Lagerstedt and B. Monemar, *J. Appl. Phys.* **45**, 2266 (1974).
14. M. Illegems, R. Dingle, and R.A. Logan, *J. Appl. Phys.* **43**, 3797 (1972).
15. Z. Yang, L.K. Li, and W.I. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1686 (1995)
16. Y. Sasaki, T. Sato, K. Matsushita, T. Hariu, and Y. Shibata, *J. Appl. Phys.* **57**, 1109 (1985).
17. B. Tuck, *Atomic Diffusion in III-V Semiconductors*, Adam Hilger, Bristol (1988) p. 16.