

HVPE법에 의한 기판재료용 후막 GaN 에피택셜 성장에 관한 연구



A Study on the Epitaxial Growth of Thick GaN Films for Substrate Materials by HVPE

송복식*, 김영호**, 이재구***, 정성훈**, 문동찬**, 김선태****

(Bok-Sik Song, Young-Ho Kim, Jae-Goo Lee, Sung-Hoon Chung, Dong-Chan Moon, Seon-Tai Kim)

Abstract

Thick GaN films are grown on (0001) *c*-plane sapphire substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) method. The growth rate of GaN is increased with increasing growth temperature. The activation energy is 0.71eV and the growth rate is 60 μ m/hr at 1050 $^{\circ}$ C. The grown GaN has microstructural cracks due to large lattice mismatch and thermal expansion coefficient difference between substrate and GaN. From double crystal x-ray rocking curve, the full width at half maximum (FWHM) for (0002) plane of GaN grown at 1050 $^{\circ}$ C is 456 arcsec. The grown GaN is n type with electron mobility and carrier concentration of 51.5cm²/V \cdot sec and 9.5 \times 10¹⁸cm⁻³, respectively. The photoluminescence spectrum at room temperature shows the strong near band edge emission at 3.41eV and a weak deep level emission peak at 2.16eV. A₁(LO) phonon peak and E₂ peak are observed at 735 cm⁻¹ and 567cm⁻¹, respectively, by Raman Spectroscopy.

Key Words (중요용어) : HVPE, GaN, Activation energy (활성화 에너지), Photoluminescence(광루미네선스), Raman Spectroscopy(라만 분광)

1. 서 론

III-V족 질화물 화합물 반도체인 GaN는 실온에서 3.4 eV의 넓은 밴드갭을 갖는 직접전이형 구조의 반도체로서, 다른 질화물 반도체 InN(1.95 eV), AlN(6.2 eV)와 이종접합(heterojunction) 구조를 만들거나 조성을 변화시켜 다양한 밴드 갭 에너지를 갖게 할 수 있어, 여러 가지 파장에서의 광전소자 뿐만 아니라, 고출력 전자소자, 고온 동작소자 그리고 표면 탄성파(SAW: surface acoustic wave)소자 등의 응용 가능성이 높은 재료이다¹⁻³⁾.

GaN 에피택셜 성장에 관한 연구는, Maruska와 Tietjen⁴⁾ Ga이 위치한 보트에 HCl을 통과시키어 형

성된 GaCl과 NH₃를 사용하여 사파이어 기판 위에 처음으로 성장하였다. 그 후 Wickenden등은⁵⁾ 1000 $^{\circ}$ C ~ 1150 $^{\circ}$ C의 온도에서 사파이어 기판 위에 GaN를 성장하였을 때, 낮은 온도에서는 다결정립의 GaN가 성장되고, 높은 온도에서는 성장된 GaN 막의 재분해가 급격히 발생됨을 보고하였다. 그러나 이와 같은 결정성장에 있어서 GaN의 결정계는 육방정계이고, 사파이어 기판 위에 완충층 없이 고온에서 GaN를 성장했을 경우 요철이 있는 육각 피라미드 형상으로 성장되며 평탄한 거울면이 생기지 않는다.

대부분의 반도체 소자제작은 불순물이나 자연 결함(native defects)에 의해 많은 제약을 받으며, 특히 질화물 반도체는 기판과의 격자부정합으로 인한 결함이 레이저 다이오드의 레이저 동작시 높은 문턱 전압을 필요로 하는 원인이 된다⁶⁾. GaN박막을 이용하여 레이저 다이오드 제작시 기판으로 사용되고 있는 사파이어와 GaN 박막 사이의 격자 부정합과 열팽창 계수 차에 의해 약 10⁴ ~ 10¹⁰ cm⁻²의 높은 밀도의 결함이 존재하기 때문에 실용화에 많은 문제점이 있다⁷⁾. 이를 해결하기 위해서는, 벌크 형태의 단결정 GaN를 성장시켜 기판으

* : 현대전자 PDP 사업추진팀
** : 광운대학교 전자재료공학과
*** : 삼성전자 반도체 사업부
**** : 대전산업대학교 재료공학과 교수
접수일자 : 1997년 1월 13일
심사완료 : 1997년 3월 8일

로 사용하는 것이 바람직하지만, GaN는 용점이 2400°C 이상이고, 질소 분해압이 1200°C에서 약 1000기압 정도로 매우 높아 통상적인 방법으로는 단결정 성장이 곤란하다. 최근 고온 고압에서의 GaN 단결정 성장이 시도되고 있으나 10kbar의 고압에서 1500°C의 온도로 유격시키면서 20시간 동안 성장하더라도 수 mm 정도 크기의 판상 결정만 얻어지고 있는 실정이다³⁾. 또한, 사파이어 기판 위에 GaN막을 성장하여 레이저 제작시 공진기용 거울면(mirror facet)을 만들기 위해서는 사파이어 기판의 견고함 때문에 가공이 매우 힘들다. 그러므로 GaN와 격자부정합과 열팽창계수 차가 적으며 가공하기 쉬운 기판을 선택하여 우수한 양질의 GaN를 성장해야만 한다.

따라서 본 연구에서는 HVPE법으로 c(0001)면 사파이어 기판 위에 GaN를 성장시켜 성장 온도에 따른 최적 조건을 구하였고, 결정학적, 전기적 및 광학적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 GaN 성장에 사용한 HVPE 장치의 개략도 및 온도구배를 나타냈다. HVPE법에 의한 GaN막성장에는 금속 Ga위로 HCl가스를 흘려주어 생성된 GaCl과 NH₃ 가스가 반응하여 기판 위에 GaN막이 성장된다. 750°C의 온도 영역에 있는 석영보트에 담긴 Ga(99.9999%)의 N₂가스로 희석시킨 HCl(99.999%)가스와 반응하여 GaCl이 형성되도록 하였다. 한편 950°C ~ 1100°C로 유지된 고온영역에서는 GaCl와 GaN 성장에 필요한 N공급원인 NH₃(99.999%)가스가 반응하여 사파이어 기판 위에 GaN막이 성장되도록 하였다.

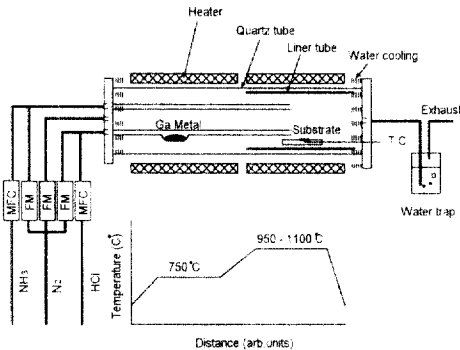


그림 1. HVPE 장치 개략도 및 온도구배
 Fig. 1. Schematic diagram of the HVPE growth system and its temperature profile.

성장에 사용한 2인치 사파이어 (Shinkosha Co.,

Ltd) 기판은 c(0001)면을 10×10×0.33mm³의 크기로 절단하여 사용하였다. 기판은 전기로 내에 설치하기 전에, 삼원화에틸렌, 아세톤, 메탄올 순으로 약 10분간 세척한 후 H₂SO₄:H₃PO₄ = 3:1(vol %) 용액에 12분간 에칭하였고, 탈이온수(D.I. water)로 10분간 씻은 후 이소프로필알코올에 넣고 끓인 다음에 N₂분위기에서 건조시켰다. GaN막 성장시 반응관내에 금속 Ga와 사파이어 기판을 정해진 자리에 놓은 후 반응관 내부를 10⁻³ torr의 진공으로 배기시켰다. 전기로의 온도를 성장온도까지 상승시켜 안정된 다음에 반응관내에 500 sccm의 NH₃와 캐리어 가스인 N₂를 2500 ml/min으로 주입하면서 1050°C에서 기판 표면을 10분간 질화(nitridation)시켰다. 사파이어 기판을 질화 시킨 후에 성장온도를 950°C에서 1100°C까지 50°C 간격으로 변화시키면서 반응 가스를 주입하여 GaN를 성장하였다. 성장시간이 경과하면 HCl의 공급을 차단한 후 전기로의 온도가 600°C까지 냉각되는 동안 NH₃를 계속 주입하여 성장된 GaN가 재분해되는 것을 방지하였다. 표 1은 GaN 막성장기에 사용한 각 가스의 유량을 나타냈다.

표 1. HVPE 시스템의 가스 유량
 Table 1. The gas flow rates for HVPE system.

Gas	NH ₃	HCl	Diluent N ₂	Main N ₂
Flow rate	500sccm	5sccm	300 ml/min	2500ml/min

성장된 GaN막의 두께와 표면상태는 금속광학현미경과 SEM을 사용하였으며, 결정 구조는 x-선 회절장치를 이용하였다. 결정품위는 이중결정 x-선 회절장치를 이용하여 반치폭(FWHM; full width at half maximum)을 구하였고, 전기적 성질은 실온에서 van der Pauw법으로⁴⁾ 홀 효과를 측정하였고, 광학적 특성은 325nm 파장의 He-Cd레이저를 사용하여 광투미네스센스와 514.5nm 파장의 Ar이온 레이저를 사용하여 라만산란을 조사하였다.

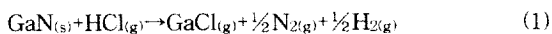
3. 결과 및 고찰

GaN와 사파이어 기판과의 격자 부정합과 열팽창계수 차가 매우 크므로 저온에서 완충층의 AlN나 GaN 막막을 성장한 후, 고온에서 GaN 막막을 성장하는 경우와 NH₃ 또는 N₂ 라디칼을 사용하여 사파이어 기판을 질화시켜 일종의 완충층 역할을 하는 질화막을 형성시킨 후에 GaN막막을 성장한다. 본 연구에서는 GaN막 성장 전에 사파이어 기판 표면을 GaN 성장시 최적의 온도인 1050°C 상압에서 NH₃ 가스 500 sccm과 N₂ 가스 2500

ml/min.으로 10분간 흘러주면서 질화시켰다. 이와 같이 표면을 질화 시킨 후, 950°C에서 1100°C까지 50°C 간격으로 성장 온도를 달리하여 성장시켰을 때, 950°C의 낮은 온도에서 성장된 GaN 표면은 옅은 황색을 띠었고 표면이 거칠게 나타났으며, 성장온도가 증가할수록 점차 표면은 깨끗하고 평탄해졌으며 무색 투명한 막으로 성장되었다. 그러나 1100°C의 온도에서 성장된 GaN 표면은 성장된 GaN가 다시 재 분해되어 표면상태가 나빠졌으며, 이러한 분해는 (0001)면에서 육방정계 형상의 에치 피트를 형성하면서 국부적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.⁵⁾

그림 2의 (a)와 (b)는 1050°C의 온도에서 30분간 성장한 두께 32μm인 GaN 단면 사진과 표면을 나타냈다. 성장된 GaN와 사파이어 기판사이의 계면은 평탄하게 성장되었으나 표면에서는 많은 크랙들이 존재하였다. 이러한 크랙들은 사파이어 기판과 성장된 GaN와의 열 팽창 계수 차가 각각 34% [$c_{\perp}(Al_2O_3)/c_{\perp}(GaN)$], 26% [$c_{\parallel}(Al_2O_3)/c_{\parallel}(GaN)$]로 매우 크기 때문에 GaN와 사파이어 기판과의 계면에서부터 발생하며 $(11\bar{2}0)_{GaN}$ 방향으로 형성되고 고밀도의 망(network)구조를 형성한다¹⁰⁾. 크랙은 성장한 GaN막과 사파이어 기판의 큰 격차 부정합과 열 팽창계수 차에 의해 발생된 결함의 축적으로 임계응력이 갑자기 완료되면서 발생하며, Hiramatsu 등¹¹⁾은 크랙이 발생하는 임계 두께는 20μm로, 이 이상의 두께에서 발생하는 것으로 보고하였다.

그림 3은 Al₂O₃(0001) 기판 위에 GaN성장시켰을 때 성장온도에 따른 두께 의존도를 나타냈다. HVPE법에 의한 GaN의 성장률은 HCl 유량(flow rate), 성장온도, 성장 분위기 및 NH₃ 가스 출구와 기판과의 거리 등에 의해 주로 영향을 받는다. 본 연구에서는 성장온도가 증가할수록 성장률이 증가하였으나 1100°C에서는 증가하는 비율이 다소 감소하였다. 성장률이 감소하는 원인으로는 HCl에서 발생한 H가스와 NH₃에서 분해된 H가스가 GaN 성장을 억제하기 때문이다.¹²⁾ 이러한 경향은 캐리어 가스로써 불활성인 He가스보다 H가스를 사용했을 때 더욱 두드러지게 나타나지만, 질소가스를 캐리어 가스로 사용한 본 연구에서는 H가스의 양은 미량이므로 H억압에 의한 영향을 무시할 수가 있다. 또 다른 성장률 감소 요인으로는 다음과 같은 두 가지 반응으로 기인된다¹³⁾.



낮은 성장 온도에서는 위의 반응이 무시되므로 온도가

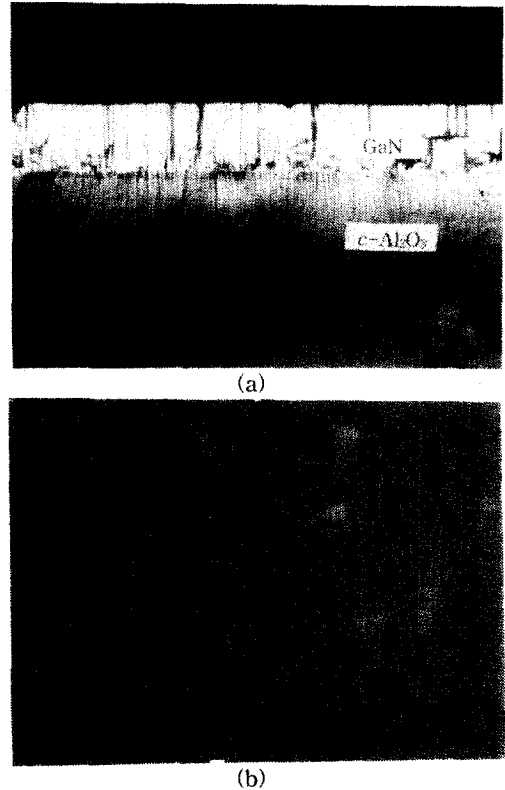


그림 2. 1050°C에서 성장한 32μm 두께의 GaN/Al₂O₃ (0001)막. (×400) (a) 단면, (b) 표면.

Fig. 2. The GaN/Al₂O₃ (0001) film grown at 1050°C with 32μm thickness. (×400) (a) cross-section (b) surface

증가함에 따라 성장률도 증가하게 되고, 높은 온도영역에서는 반응식 (1)과 (2)에 의해 성장률이 감소하게 된다. 일반적으로 VPE법으로 III-V 화합물 반도체 성장시 임의의 특정온도에서 최대의 성장률을 가지며, 임의 온도보다 낮은 온도영역에서의 성장률은 온도가 감소할수록 지수함수적으로 감소하며 높은 온도영역에서도 감소하게 된다¹⁴⁾. 그림에서 성장률이 성장온도에 따라 선형으로 비례하는 영역에서 성장률 $\ln r$ 과 $1/T$ 의 관계로부터 구한 GaN 성장에 필요한 활성화 에너지는 0.74eV (17kcal/mol)이었다. Shaw 등은¹⁵⁾ Ga-As-Cl₃계(system)로 GaAs를 성장시켰을 때 표면 반응기구에 의한 성장의 경우 0.65eV (15kcal/mol)의 활성화 에너지를, 확산기구에 의한 성장은 1.735eV (40kcal/mol)가 됨을 보고하였고, Shintani 등은¹³⁾ HVPE법으로 성장한 GaN의 활성화 에너지가 1.1eV (25kcal/mol)로 이는 표면 반응기구에 의해 성장된다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구

에서 구한 활성화에너지 값으로 보아 표면 반응기구에 의해 성장됨을 알 수 있다. 기판온도를 1050°C로 고정시키고 성장시간을 증가시켰을 때 성장률은 시간이 증가할수록 선형적으로 증가하였고, 평균 성장률은 60 $\mu\text{m/hr}$ 이었다.

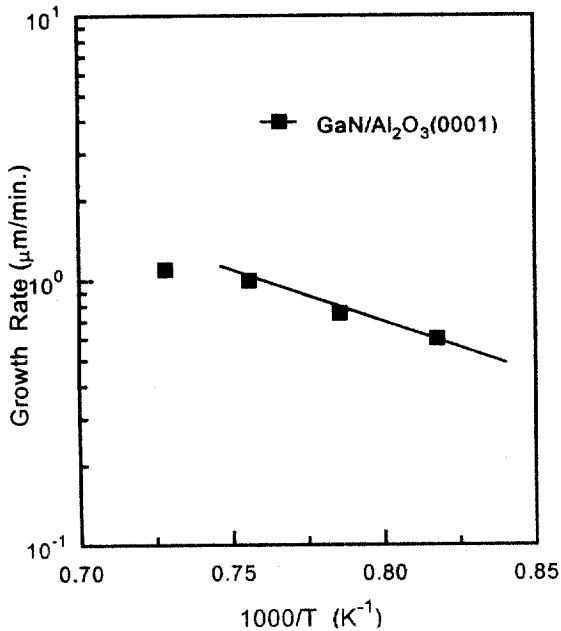


그림 3. 성장온도에 따른 GaN 성장률.

Fig. 3. Growth rate of GaN at various growth temperatures.

성장온도를 달리하여 10분간 성장한 GaN의 x-선 회절도를 그림 4에 나타냈다. 회절 강도 및 d-값을 JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 카드와 비교하여 성장된 막이 육방정계 구조임을 확인하였고, 십아연광 구조에 의한 피크는 나타나지 않았다. 육방정계의 GaN는 각도 2θ 가 32.4°

(10 $\bar{1}0$), 34.6° (0002), 37° (10 $\bar{1}1$), 48.2° (10 $\bar{1}2$), 57.9° (11 $\bar{2}0$), 63.6° (10 $\bar{1}3$), 67.8° (20 $\bar{2}0$), 69.2°

(11 $\bar{2}2$), 72.9° (0004)에서 피크가 나타난다. 그림에서와 같이 사파이어 기판 위에 성장한 GaN는 34.6°의 (0002)면에서 주 피크가 관측되었고, 72.9°에서 GaN (0004)면에 의한 피크가 나타났다. 성장온도가 증가함에 따라 34.6°의 (0002)면의 주 피크와 (0004)의 GaN 피크 외에는 관찰되지 않았으나, 1100°C에서는 37°

(10 $\bar{1}1$) 피크가 나타났다. 이와 같은 결과는 성장 온도가 높기 때문에 성장된 GaN막이 재분해되어 결정성이 나빠지는 것으로 사료된다.

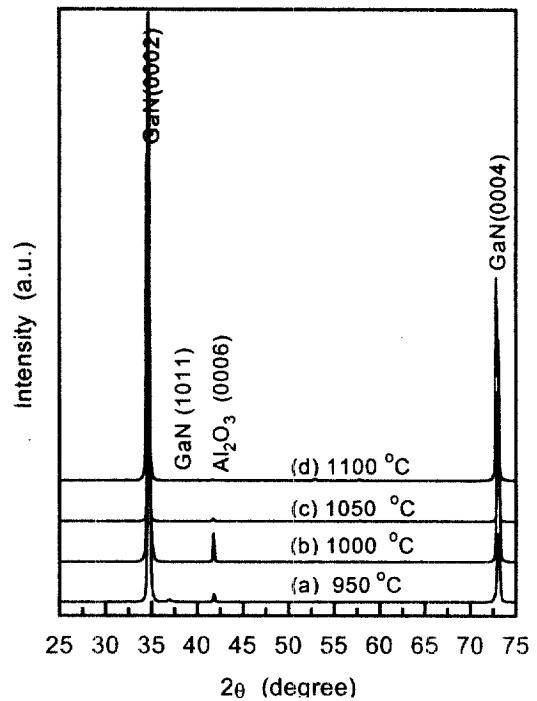


그림 4. 성장온도를 달리한 GaN의 x-선 회절도.

Fig. 4. XRD patterns of the GaN epilayers grown at various growth temperatures.

1050°C의 온도에서 10분간 성장시킨 GaN의 34.6°의 GaN (0002)면 방향에 대하여 측정된 이중 결정 x-선 회절도를 그림 5에 나타냈다. Amano등은¹⁶⁾ 기판 온도가 증가함에 따라 열팽창 계수 차가 크게되므로 반치폭이 증가한다고 보고하였으나, 본 연구에서는 성장 온도 1050°C까지는 결정질이 향상되어 반치폭이 줄어들었으며, 1100°C에서는 반치폭이 다시 증가하였다. 1050°C에서 10 μm 의 두께로 성장한 GaN막의 반치폭은 456 arcsec로 Shintani 등이¹⁷⁾ HVPE법으로 성장한 720 arcsec와 비교할때 아주 작은 값으로 양질의 GaN막이 성장되었음을 알 수 있다.

불순물을 첨가하지 않고 사파이어 기판 위에 성장시킨 GaN막에 대하여 실온에서 Hall 효과를 측정한 결과, 성장된 GaN의 전기 전도도는 모두 n형이었다. 성장 온도를 1050°C까지 증가함에 따라 전자농도가 감소하다가 다시 1100°C의 고온에서는 증가하였다. 불순물을 첨가하지 않은 GaN의 캐리어 농도는 주로 질소 공격지에 의해 영향을 받는다. 낮은 온도에서 성장시킨 GaN 막은 질소 공급원인 NH₃가 완전하게 분해되지 않아 GaN 성장에 필요한 질소가 충분히 공급되지 않으므로 캐리어 농도가 높게 나타난다.¹⁸⁾ 최적의 온도 이상에서 다시

캐리어 농도가 증가하는 것은 성장된 GaN 박막이 재분해되어 질소가 빠져나가기 때문이다. 1050°C에서 성장시킨 GaN 박막은 전자 이동도 $51.5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$, 캐리어 농도는 $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이었다.

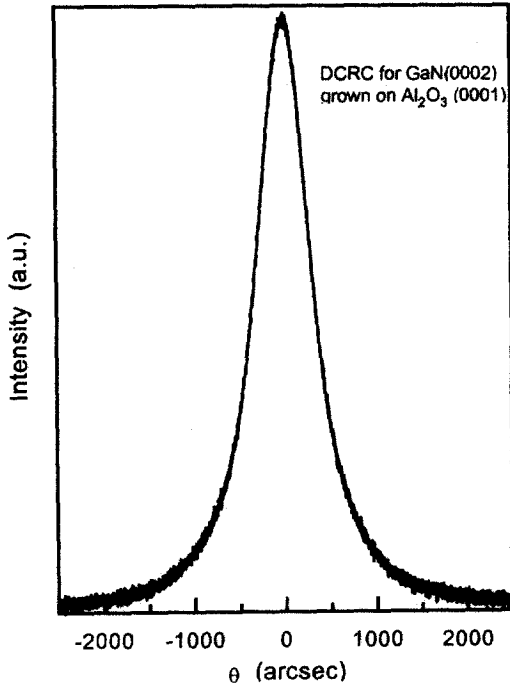


그림 5. 1050°C에서 성장한 GaN 막의 이중 결정 x-선 회절도.

Fig. 5. Double crystal x-ray rocking curve from the GaN film grown at 1050°C.

그림 6은 실온에서 입사여기 강도가 5mW인 325nm의 He-Cd 레이저로 여기시켜 실온에서 측정된 광루미네센스 스펙트럼을 나타냈다. 그림에서와 같이 3.41eV에서의 강한 발광피크와 2.16eV 부근의 깊은 준위에 의한 피크가 관찰되었다. 3.41eV의 주 피크는 밴드 갭 부근 (band-edge) 방출에 의한 피크이고, 2.16eV 부근의 폭이 넓은 스펙트럼의 근원은 아직 알려져 있지 않으나, 일반적으로 C, 또는 N공격자(V_N)와 관련된 깊은 준위에 의한 방출로 주로 2.2eV에서 나타난다.^{19,20)} 그러나 본 연구에서는 2.16eV에서 나타나는데, 이러한 결과는 기판과 성장된 GaN 박막 사이의 계면에 존재하는 결함 밀도나 결함 종류에 따라 약간씩 다르게 나타나는 것으로 알려져 있었다.

성장온도에 따른 I(band-edge) 방출에 의한 피크 강도와 I(deep level) 방출의 피크 강도 비는 성장온도가 낮은 온도영역에서는 낮게 나타났으며, 최적의 온도인

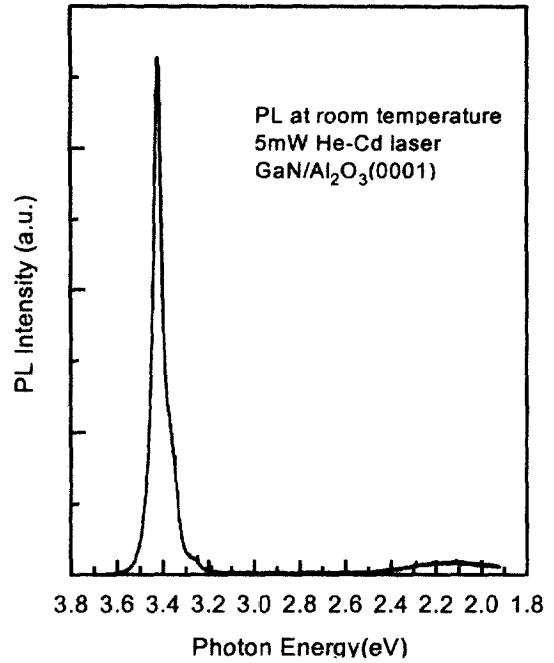


그림 6. 1050°C에서 성장한 GaN의 광루미네센스 스펙트럼. (300K)

Fig. 6. 300K photoluminescence spectrum of the GaN grown at 1050°C.

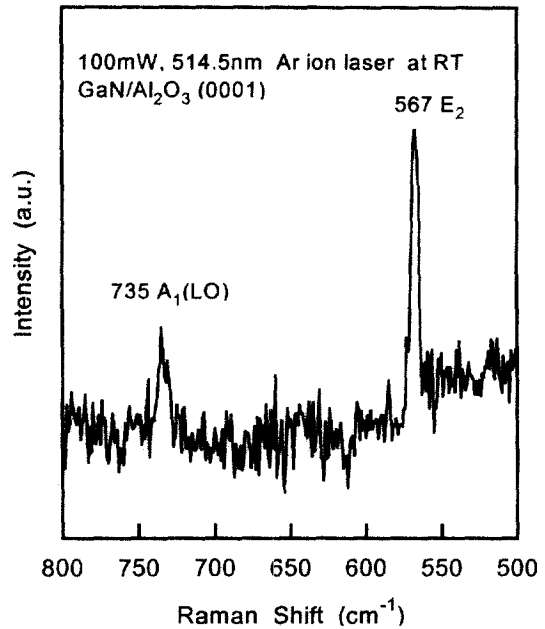


그림 7. GaN막의 라만 스펙트럼.

Fig. 7. Raman spectrum of the GaN film.

1050°C에서 성장한 GaN막막이 가장 높은 값을 보였다. 또한 1050°C의 온도에서 성장된 GaN의 주 피크 반치폭은 30.6 meV로 나타났으며, AlN를 완충층으로 사용하여 MOCVD법으로³¹⁾ 성장한 GaN막막의 반치폭인 80 meV보다 작은 값으로써 매우 우수한 특성을 갖는 GaN막막이 성장되었음을 알 수 있다. 그림 7은 1050°C의 온도에서 8 μ m두께로 성장한 GaN막에 대한 라만 산란을 실온에서 측정된 스펙트럼을 나타냈다. 이때, 100mW의 514.5nm의 Ar이온 레이저를 성장된 GaN막막에 입사시켰으며, 본 실험에서는 후방 산란 배치(backscattering configuration)로 하였다.

후방산란 배치는 A₁(LO)와 E₂모드가 관측가능하며, 그림에서와 같이 735cm⁻¹에서 A₁(LO) 포논 피크와 567cm⁻¹에서 E₂ 피크가 관찰되었는데, 이러한 결과로 보아 wurtzite 구조의 선택물을 잘 만족하는 GaN가 성장되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 HVPE(hydride vapor phase epitaxy)법으로 Al₂O₃(0001)기판 위에 후막 GaN를 성장하였다. 성장된 GaN는 x-선 회절법을 이용하여 구조를 확인하였고, 결정 품질을 평가하기 위하여 이중 결정 x선 회절을 사용하였다. 전기적 특성으로는 실온에서 홀 효과 특성을 조사하였으며, 광학적 특성은 광루미네센스와 라만산란을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GaN 막막 성장률은 성장온도가 증가함에 따라 증가하였고, 950°C에서 1050°C까지의 온도 범위에서 활성화 에너지는 0.74eV이었고, 최적의 성장온도 1050°C에서 표면상태가 양호한 GaN막막을 얻었으며, 성장률은 60 μ m/hr였다.
2. x-선 회절 조사로부터 GaN 막막은 육방정계 구조를 보였으며, 이중 결정 x-선 회절로부터 구한 반치폭은 성장 온도가 증가할수록 감소하였으며, 최적의 온도에서 반치폭이 456 aresec인 양질의 GaN막을 얻을 수 있었다.
3. 실온에서 홀 효과 측정으로부터 GaN막의 전기전도도는 n 형이었고, 전자 이동도와 캐리어 농도는 각각 $\mu=51.5$ cm²/V·sec, $n=9.5 \times 10^{18}$ cm⁻³이었다
4. 실온에서 측정된 광루미네센스 스펙트럼은 3.41 eV의 밴드갭 부근(band-edge) 방출이 주 피크로 나타났고, 2.16 eV에서 아주 약한 깊은 준위에 의한 방출을 나타냈다. 라만산란은 wurtzite형 결정 구조의 선택물을 잘 만족하는 A₁(LO) 포논 모드가 735 cm⁻¹에서 나타났고, E₂ 포논 피크는 567 cm⁻¹에서 관찰되었다.

이상의 결론으로부터 HVPE법으로 사파이어 기판을 질화시키어 결정 품질이 우수한 GaN 막막을 성장할 수 있었다. 이와 같이 높은 성장률로 성장한 GaN 막은 단파장용 광전자 소자 제작에 필요한 기판으로서 이용이 가능하다.

* 본 논문은 한국과학재단 '96핵심전문연구 과제(과제번호 : 961-0209-055-1) 연구비로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. H. Morkoç et al., "Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies", J. Appl. Phys., Vol.76, No.3, pp.1363-1398, 1994.
2. M. A. Khan., "Microwave performance of a 0.25 μ m gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor", Appl. Phys. Lett., Vol.65, No.9, pp. 1121-1123, 1994.
3. M. A. Khan et al., "Metal semiconductor field effect transistor based on single GaN", Appl. Phys. Lett., Vol.62, No.15, pp.1786-1787, 1993.
4. H. P. Maruska et al., "The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN", Appl. Phys. Lett., Vol.15, No.10, pp.327-329, 1969.
5. D. K. Wickenden et al., "Growth of epitaxial layers of gallium nitride on silicon carbide and corundum substrates", J. Cryst. Growth., Vol.9, pp.158-164, 1971.
6. W. Götz, L. T. Romano, B. S. Krusor, N. M. Johanson and R. J. Molnar, "Electronic and structural properties of GaN grown by hydride vapor phase epitaxy", Appl. Phys. Lett. Vol.69, No.2, pp.242-244, 1996
7. Compound Semiconductor, Nov/Dev, p 9, 1995
8. I. Gezeyory et al., "III-V nitrides - Thermo dynamics and crystal growth at high N₂ pressure", J. Phys. Chem. Solids., Vol.56, No.3/4, pp.639-647, 1995.
9. L. J. van der Pauw., "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape", Philips Research Report., Vol.13, pp.1-8, 1959.
10. N. Itoh et al., "Study of cracking mechanism in

GaN/ α -Al₂O₃ structure", J. Appl. Phys., Vol.58, No. 5, pp.1828-1837, 1985.

11. K. Hiramatsu et al, "Relaxation mechanism of thermal stresses in the heterostructure of GaN grown sapphire by vapor phase epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.32, No.4, pp.1528-1533, 1993.
12. A.S.Adonin et al, "Growth and doping kinetics, cathodoluminescence and electrical properties of heteroepitaxial layer of gallium nitrides", Inorganic. Matr., Vol.17, No.17, pp.1187-1191, 1982.
13. A.Shintani et al., "Kinetics of epitaxial growth of GaN using Ga, HCl, NH₃", J. Cryst. Growth., Vol.22, pp1-5, 1974.
14. W.Seifert et al., "Study on the growth rate in VPE of GaN", J. Cryst. Growth., Vol.52, pp. 257-262, 1981.
15. D. W.Shaw, "Influence of substrate temperature on GaAs epitaxial deposition rates", J. Electrochem.Soc., Vol.115, No.4, pp.405-408, 1968.
16. H. Amano et al, "Metalorganic chemical vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer", Appl. Phys. Lett., Vol.48, No.3, pp.353-355, 1983.
17. A. Shintani et al. "X-ray diffraction topology and crystal characterization of GaN epitaxial layers for light emitting diodes", J. Electrochem. Soc., Vol.125, No.12, pp.2076-2078, 1978.
18. R.K. Crouch et al., "Properties of GaN grown on sapphire substrates", J. Matr. Sci., Vol.13, pp. 2358-2364, 1978.
19. T. Suski et al., "Mechanism of yellow luminescence in GaN", Appl. Phys. Lett., Vol.67, No.15, pp.2188-2190, 1995.
20. P. Kung et al, "High quality AlN and GaN epilayers grown on (0001) sapphire, (100), and (111)silicon substrates", Appl. Phys. Lett., Vol.66, No.22, pp.2958-2960, 1995.

저서소개

송복식



1967년 12월 1일생. 1990년 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 1992년 동 대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(박사). 1997년 3월-현재 현대전자 부품소재부문 PDP사업추진팀 근무.

김영호



1954년 6월 12일생. 1977년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업. 1979년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 현재 수원대학교 전자재료공학과

이재국



1968년 8월 29일생. 1995년 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 1997년 동 대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1997년 현재 삼성전자 반도체 사업부 근무.

정성훈



1965년 1월 22일생. 1991년 광운대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1993년 동 대학교 일반대학원 졸업(석사). 1993년-95년 LG전자부품연구소 주임연구원. 현재 광운대학교 전자재료공학과 박사 과정.

문동찬



1935년 2월 25일생. 1957년 연세대 이공대 물리학과 졸업. 1965년 연세대 대학원 물리학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1982년 미국 라이트-페더슨 공군연구소 초빙과학자. 현재 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수.

김선태



1956년 9월 11일생. 1981년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박). 현재 대전산업대학 재료공학과 조교수.