

사파이어 기판 방향성에 따른 GaN 박막의 미세구조

김유탉

경기대학교 첨단산업공학부, 수원, 442-760
(1999년 2월 11일 접수)

Microstructure of GaN films on sapphire surfaces with various orientations

Yootaek Kim

Division of Advanced Industrial Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea
(Received February 11, 1999)

요 약 3가지 방향성을 가진 사파이어 기판 위에 GaN 박막을 OMVPE 방식으로 증착시켜 증착된 GaN epilayer를 투과전자현미경으로 분석하여 각 미세구조의 차이를 비교분석 하였다. 3가지 방향 모두에서 GaN 증착층이 관찰되었으며 그중 가장 좋은 경계면의 상태와 단일 결정성을 보여준 것은 사파이어 {0001}방향의 기판을 사용한 경우였다. 결함들도 {0001}방향의 기판을 사용한 경우에서 가장 적게 나타났다. 모든 경우에서 buffer layer는 발견되어지지 않았고 그럼에도 불구하고 경계면에서의 격자 뒤틀림이 일어나는 지역이 수 나노미터(nanometer) 정도밖에 안되는 우수한 경계면들이 관찰 되었다. 따라서 일반적으로 GaN 박막 증착시에 가장 많이 사용되는 사파이어 basal plane외에도 결함이 많기는 하지만, {1120}와 {1102} plane 위에도 GaN 증착층이 buffer layer 없이 증착 될 수 있다는 사실을 TEM 관찰을 통하여 알 수 있었으며 사파이어 {0001}면을 기판으로 사용한 경우에 미세구조 측면에서 볼 때 hetero-epitaxial한 GaN 박막층을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract GaN epilayers deposited by the OMVPE method on sapphires with 3 different surface orientations were investigated by TEM and their differences in microstructure were compared with each other. GaN epilayers were grown on the all three kinds of sapphire substrates; however, the best interfacial state and crystallinity were observed in the specimen using a {0001} substrate. The density of defects in GaN epilayers on {0001} substrates was also less than others. No buffer layer was found at the interfaces of all the specimens; however, it was observed that the region which shows lattice distortion at the interface was only a few nanometer wide. Accordingly, TEM investigation revealed that GaN epilayers having some internal defects could be grown on sapphire {1120} and {1102} planes without a buffer layer, and the hetero-epitaxial GaN films were obtained from the specimen using {0001} substrates with the microstructural point of view.

1. 서 론

III족 질화물들은 일반적으로 견고할 뿐만 아니라, 열적·화학적 매우 안정하다. 이러한 성질이 프로세스상 불리한 면도 있지만, 소자동작의 안정성과 고온 안정성 및 내환경 특성 등이 우수하기 때문에 차세대 광전 소자의 재료로 각광을 받고 있다[1, 2]. GaN는 넓은 band gap을 가지는 직접천이형 밴드구조를 가지고 있다. 따라서 GaN는 청색에서 자외선 영역까지의 단파장 발광체로 이용되어 light emitting diodes(LEDs)나

laser diodes(LDs)에 응용이 가능하며, 이외에도 고밀도 광디스크 메모리, 고속 레이저 프린터, HDTV 비디오 디스크, 광계측 기기등에 광범위하게 응용할 수 있다[3-5]. 또한 GaN는 기존의 반도체보다 우수한 전자 이동속도, 포화 전자속도, 항복전장장의 세기와 높은 mobility를 갖고있기 때문에 광전재료 뿐만 아니라 고주파 및 고출력용 전력소자 재료로서의 적용도 가능한 것으로 입증되고 있다[6, 7].

이러한 이점들 때문에 선진 각국에서는 상업용 GaN 소자개발을 경쟁적으로 수행하고 있으며, 일부 연구진

들에 의해 저온 성장법이 확립되고 buffer layer를 이용한 박막의 질 향상 등의 성과도 발표되고 있다[8, 9]. 소자개발 측면에서 보면 single quantum well(SQW)의 실현과 주파수 77 GHz에 이르는 field effect transistor(FET)의 제작 등에 관한 보고도 있다[10, 11].

이러한 성공적인 연구결과에도 불구하고, GaN의 소자화를 위해서는 해결 해야할 많은 문제점들이 있다. 지난 수년간 GaN 박막은 사파이어 기판 위에 유기금속 기상화학 증착법(OMVPE: organo-metallic vapor phase epitaxy)에 의해 가장 많이 증착되어 왔다[12-14]. 하지만 너무 높은 증착온도는 상업화에 걸림돌이 되고있고, buffer layer를 도입한 GaN 박막은 격자 불일치 문제는 해결하였지만 물성이 저하되는 현상으로 그 효용성이 떨어지고 있다. 또한 광전소자내의 높은 결합밀도와 첨가물질(dopant)의 사용 제약 역시 GaN 광전소자의 기능향상에 장애요인들로 작용하고 있다[15].

많은 연구자들이 여러 가지 기판재료에 다양한 방법을 사용하여 GaN 박막을 성장시키고자 하였다. 하지만 실제 기판 재료로 가장 많이 사용되고있는 사파이어의 방향성에 따른 GaN 박막의 성질을 미세구조측면에서 비교한 연구는 거의 없다[16, 17]. 다만 각 방향별로 수행한 독립적인 미세구조의 연구는 몇몇 발견할 수 있다[18, 19]. 또한 GaN epilayer의 질을 판단하는 기준으로 FWHM(full width half maximum) 측정을 일반적으로 많이 수행하고 있지만 실제 영상 데이터가 아니라는데에 문제점이 있다[20]. 따라서 본 연구에서는 사파이어 {0001}, {1120}, {1102}, 3종류의 상업적으로 입수 가능한 기판을 사용하여 OMVPE법으로 GaN 박막을 동일한 조건에서 증착시켜 이들의 표면 특성과 계면의 미세구조를 AFM과 고분해능 TEM을 이용하여 비교함으로써 기판의 방향성에 따른 GaN epilayer의 결정특성 변화를 밝히고자 하였다.

2. 실험

실험에 사용된 사파이어 기판은 상업용으로 매우 잘 연마된 Union Carbide 사의 {0001};C-plane, {1120}; A-plane, {1102};R-plane 기판이었으며[17, 21], 증착 전 별다른 처리 없이 alcohol로 간단히 세척한 후 건조하여 사용하였다.

증착시 압력은 85 torr로 유지 시켰으며, 사파이어 기판은 850°C 질소분위기에서 10분간 전처리 한 후 온도를 650°C로 낮춰 30초간 암모니아를 유입 시켰다. 이러한 암모니아 처리공정은 양질의 epilayer를 성장시키는 데 반드시 필요한 과정으로 생각되어 진다. 이와 같은

전처리 후 850°C에서 V/III 몰랄 입력 분율을 3324로 유지시키면서 GaN 증착이 90분간 이루어 졌다.

원료가스로는 고순도의 TEGa(tetra-ethyl gallium)와 암모니아(NH₃)가 사용되었다. 사파이어 기판은 PBN heater를 사용하여 850°C까지 가열하였고, 유입되는 TEGa는 반응기 중앙에 집중되도록 하고 암모니아는 반응기 중심 주위를 감싸도록 gas inlet을 배치하였다. 반응기의 재질은 stainless-steel 이었으며 quartz window를 통하여 증착과정을 관찰할 수 있었다.

GaN films의 표면 roughness 측정을 위하여 atomic force microscope(AFM)가 사용되었고, 박막의 질과 방향성은 X-ray diffractometer(XRD)에 의해 시험되어 졌다. 계면의 미세구조의 관찰을 위해서 시편의 단면들은 focused ion beam(FIB) 방식에 의하여 약 50 nm 이내로 연마되어진 후 transmission electron microscope(TEM)에 의하여 관찰되어졌다. TEM 관찰시 전자 가속전압은 300 keV 였으며 고분해능 pole piece를 장착한 TEM을 사용하여 시편의 계면으로부터 고분해능 투과전자현미경(HRTEM) 상을 얻고 그 상에 해당하는 전자회절도형(electron diffraction pattern)을 얻어 epilayer의 결정성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. XRD 해석

Fig. 1은 사파이어 C, A, R면으로 각각 배향된 사파이어

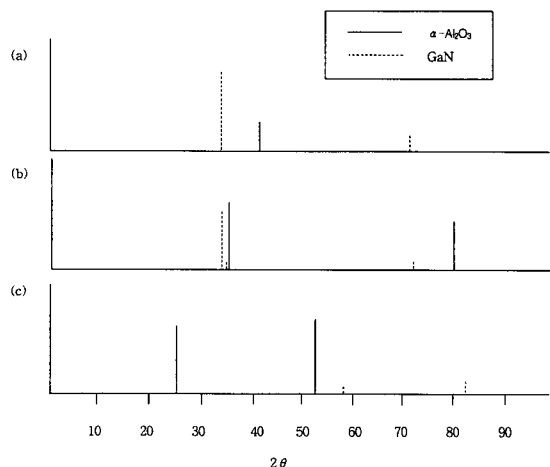


Fig. 1. XRD patterns from the GaN thin films on three different orientation sapphire substrates. (a) {0001}, (b) {1120}, (c) {1102}.

어 기판 위에 성장된 GaN 박막을 XRD로 시험한 결과이다. 사파이어 {0001} 기판 위에 증착된 GaN 박막으로부터 얻은 XRD 피크는 Fig. 1(a)에서 보는바와 같이 $2\theta = 41.7^\circ$ ($d = 2.16 \text{ \AA}$)에서 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ {0006}의 피크가 얻어졌고 $2\theta = 34.5^\circ$ ($d = 2.59 \text{ \AA}$)와 72.9° ($d = 1.29 \text{ \AA}$)에서 각각 GaN {0002}와 {0004}에 해당하는 피크를 얻었다. GaN의 피크강도가 다른 방향성을 가진 시편과 비교하여 상대적으로 큰 것으로 보아 상당히 두꺼운 층의 GaN가 증착된 것으로 예측할 수 있었다. Fig. 1(b)는 사파이어 A면 위에 증착된 GaN 박막으로부터 얻은 피크로서, $2\theta = 34.6^\circ$ ($d = 2.59 \text{ \AA}$), 36.7° ($d = 2.45 \text{ \AA}$), 72.9° ($d = 1.30 \text{ \AA}$)에서 각각 GaN {0002}, $\{10\bar{1}1\}$, {0004}에 해당하는 피크를 얻었다. $2\theta = 37^\circ$ 부근에서 주피크가 발견된 이유는 사파이어 $\{11\bar{2}0\}$ 면과 GaN $\{10\bar{1}1\}$ 면으로부터 발생된 피크가 겹쳐져 나타났기 때문으로 사료되며, 사파이어 $\{11\bar{2}0\}$ 면 위에도 사파이어 {0001}면에서와 같이 GaN가 $\langle 0001 \rangle$ 방향으로 성장한 사실을 확인할 수 있었다. 하지만 Figs. 1(a)와 1(b)에서 GaN {0002}면과 {0004}면으로부터 얻어진 피크들의 강도를 비교해보면 사파이어 {0001}면에 증착된 GaN epilayer가 보다 두껍게 증착되었다는 것을 예상할 수 있었다. Fig. 1(c)는 사파이어 $\{1\bar{1}02\}$ 면 위에 증착된 GaN 박막으로부터 얻은 XRD 피크로서 $2\theta = 25.6^\circ$ ($d = 3.48 \text{ \AA}$)와 52.5° ($d = 1.74 \text{ \AA}$)에서 나타나는 주 피크들은 각각 사파이어 기판 $\{1\bar{1}02\}$ 면과 $\{2\bar{2}04\}$ 면들로부터 기인한 것이며, GaN 박막으로부터 기인된 피크는 $2\theta = 57.9^\circ$ 와 82.2° 에서 얻어졌다. 이들 피크는 각각 GaN $\{11\bar{2}0\}$ 와 $\{10\bar{1}4\}$ 로부터 기인된 것들로 서로 다른 방향성을 가진 GaN epilayer들이 함께 성장한 것으로 예상되어진다. 또한 Figs. 1(a)와 1(b)에서 얻어진 GaN 피크와 비교할

때 그 강도가 매우 미미하였다. 따라서 XRD 분석결과에 의하면 사파이어 {0001}면과 $\{11\bar{2}0\}$ 면에서의 GaN 주 성장방향은 $\langle 0001 \rangle$ 으로 동일하였으며, $\{1\bar{1}02\}$ 면에는 GaN epilayer가 제대로 성장하지 못 하였거나, 성장하였더라도 주 성장방향을 가지지 못하는 아주 얇은 층을 형성할 가능성이 있는것으로 판단되었다.

3.2. AFM 관찰

기판으로 사용한 3종류의 사파이어 단결정들의 표면 상태를 파악하기 위하여 증착하기전 AFM(atomic force microscope)으로 관찰하였다. AFM에 의해 조사된 표면의 상태는 Table 1에 요약하였다. 사파이어 기판의 해석영역은 약 $2 \mu\text{m}^2$ 와 $0.1 \mu\text{m}^2$ 정도로 비교하기 쉽도록 모두 범위를 비슷하게 조정하였다. $\{11\bar{2}0\}$ 면과 $\{1\bar{1}02\}$ 면의 표면 조도는 거의 비슷하였다. {0001}면의 경우에는 표면조도가 다른 방향의 면들보다 현격하게 좋은 것으로 나타났다. 사파이어 기판은 모두 같은 회사에서 제조된 것을 사용하였기 때문에 제조방법과 연마방법이 동일할 것으로 생각되어지나 이렇게 현격한 조도의 차이를 보이는 것은 사파이어의 결정구조상의 특징 때문으로 사료되어진다.

기존의 전자현미경 분석에 의하면 표면에너지와 결정구조의 차이에 의하여 사파이어 표면의 조도는 결정의 방향성에 따라 크게 차이가 나며, 특히 {0001}면에서 가장 평탄하고 낮은 step 밀도를 가진다고 보고하고 있다 [22]. 이러한 보고는 본 실험결과와 일치하며 {0001}면이 기판재료로서 선호되는 이유중의 하나임을 알 수 있었다. Fig. 2는 세 종류의 사파이어 기판 위에 증착된 GaN 박막을 $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$ 영역에서 관찰한 AFM

Table 1

AFM surface analyses of three epitaxial GaN films grown on sapphire C, A, and R planes and sapphire substrates themselves

	Orientation	Analysed rea (μm^2)	Highest depth difference (nm)	RMS roughness (nm)	Average height (nm)	Corresponding figures
Sapphire	{0001}:C	2.434 0.07893	2.54 0.714	0.343 0.09	3.94 0.538	- -
	$\{11\bar{2}0\}$:A	2.231 0.1174	35.9 1.53	2.09 0.226	7.05 1.72	- -
	$\{1\bar{1}02\}$:R	1.732 0.1012	26.9 1.69	1.92 0.300	15.6 1.97	- -
GaN	on {0001}:C	2.297 0.005802	214 70.6	390 18.6	138 132	Fig. 2a -
	on $\{110\}$:A	2.100 0.008399	171 90.1	27.2 19.7	124 47.5	Fig. 2b -
	on $\{102\}$:R	2.263 0.007129	44.9 27.8	6.69 5.58	25.3 11.4	Fig. 2c -

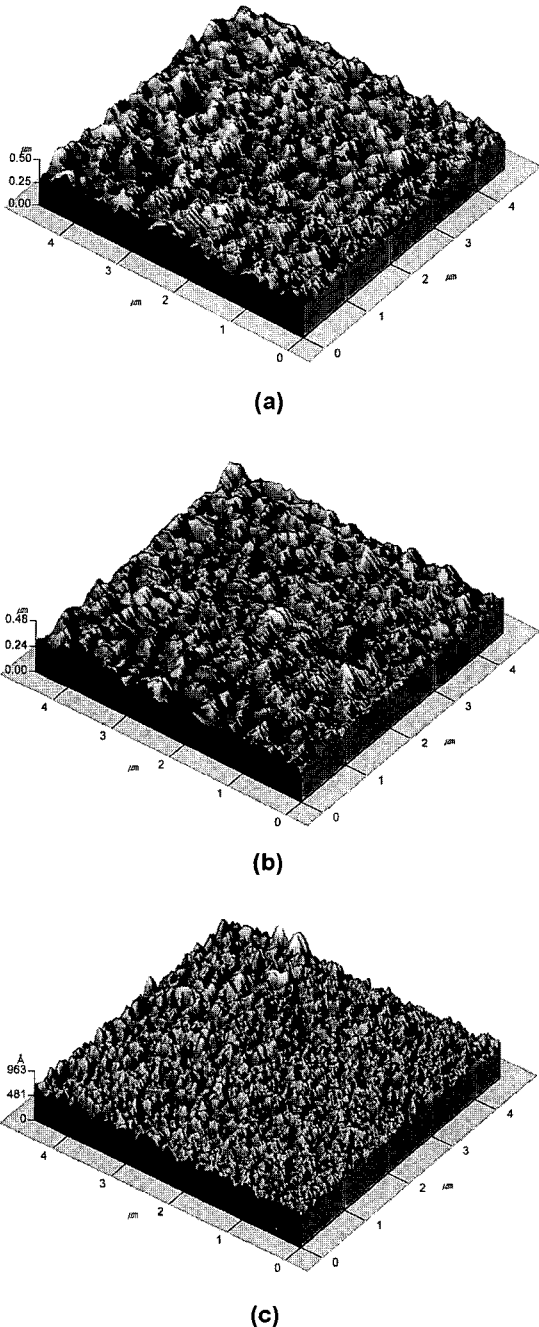


Fig. 2. AFM images from the surface of GaN on sapphire (a) {0001}, (b) {1120}, (c) {1102} substrates.

영상이다. Table 1에 정리된 영역 해석 자료를 보면 GaN의 평탄도는 {0001}, {1120}, {1102} 순으로 좋아지는 것을 알 수 있다. 이는 예상과는 상반되는 결과로서 가장 보편적으로 사용하는 {0001} 기판 위에 증착된

GaN 박막의 roughness가 {1102} 기판 위에 증착된 GaN 박막보다 50배 정도 거칠다는 것은 주목해야 할 사실이다. 이렇게 현격한 roughness의 차이를 보이는 것은 기판방향에 따라 GaN 박막의 증착방향 역시 달라질 수 있으며 이러한 증착방향의 차이에 기인한 박막 증착속도의 차이 때문에 증착속도가 빠른 {0001}의 경우가 더욱 거칠은 표면양상을 보이는 것으로 추정된다.

3.3. TEM 관찰

Figs. 3(a), 3(b), 3(c)는 각각 사파이어 {0001}, {1120}, {1102}면과 그 위에 증착된 GaN 박막을 포함한 경계면을 모두 보여주는 고분해능 투과전자현미경 단면 영상들이다. Fig. 3(d)는 Fig. 3(a)의 경계면으로부터 얻은 전자회절 도형으로 사파이어와 GaN로부터의 회절패턴이 겹쳐져 나타나고 있다.

Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 사파이어 {0001} 표면 위에 GaN epilayer가 buffer layer의 도입 없이 거의 완벽한 구조를 가지며 결합이 없는 상태로 성장된 것을 알 수 있다. 경계층으로부터 1~2 nm 정도의 영역에서 사파이어와 GaN의 lattice mismatch로 인한 격자의 뒤틀림현상이 미소하게 관찰되어지나 그로 인한 결합의 발생이나 전파는 거의 발견할 수 없다. Epilayer의 성장방향은 Fig. 3(d)의 전자회절 분석으로부터 <0001> 방향임을 확인할 수 있다.

Fig. 3(b)는 사파이어 {1120}면 위에 증착된 GaN epilayer의 단면사진으로서 이미 발표된 바와 같이 여러 가지 방향성을 가진 epilayer들이 서로 경쟁적으로 자란 것을 알 수 있다[23]. Fig. 3(a)와 비교해 볼 때 경계면에서의 lattice distortion이 심하고 그 영역 또한 상대적으로 넓은 것을 알 수 있다. 각종 결함들도 Fig. 3(a)의 경우보다 훨씬 많이 발견되어 진다. 따라서 사파이어 {1120}면을 사용한 경우에는 epilayer의 방향성이 다양하고 결함도 비교적 많은 GaN층을 얻을 수 있었다.

Fig. 3(c)는 사파이어 {1102}면 위에 증착된 GaN 증착층의 단면사진으로서 역시 GaN 증착층을 관찰할 수 있다. 하지만 이 시편의 경우 시편준비 방식중 하나인 FIB 방식의 특성상 회전축의 움직임이 매우 제한되기 때문에 정확한 정대축을 얻을 수 없어서 다른 TEM 영상보다 해상도가 현저히 저하된 영상만을 얻을 수 있었다. 하지만 Fig. 3(c)에서 보듯이 부분적으로는 lattice fringe들이 발견되어진다. 따라서 부분적으로는 사파이어 {1102}면 위에도 GaN epilayer가 형성됨을 확인할 수 있었지만, 박막의 성장 방향이나 epilayer의 질등을 확실히 판단하기에는 자료가 부족하여 일반적인 시편 준비방법에 의한 시편의 재관찰이 요구되어진다.

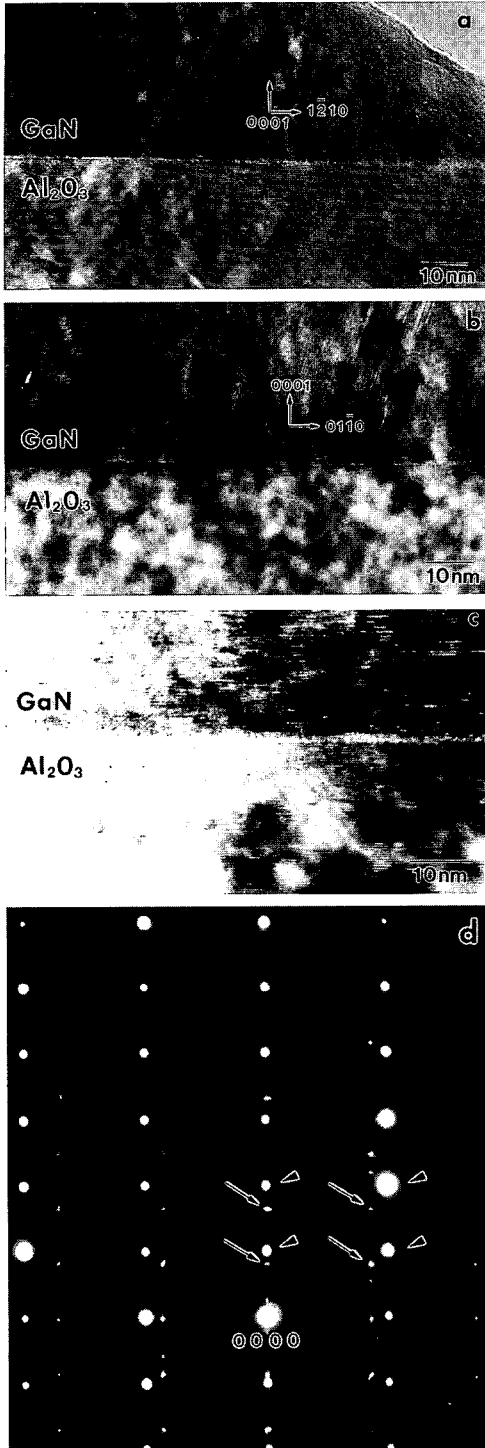


Fig. 3. Cross sectional HRTEM images and a corresponding electron diffraction pattern. (a) GaN-Sapphire {0001} interface, (b) GaN-Sapphire {1120} interface, (c) GaN-Sapphire {1102} interface, (d) electron diffraction pattern from the interface of Fig. 3(a).

Fig. 3(d)는 Fig. 3(a) 영상의 경계면으로부터 얻은 전자회절 도형으로서 화살촉만으로 표시된 점들은 사파이어로부터 기인된 점도형들이고 긴 화살표로 표시된 희미한 점들은 GaN epilayer로부터 기인된 점들이다. 경계면에 겹쳐서 전자빔을 투사하였기 때문에 Fig. 3(d)에 나타난 회절 도형은 두 물질로부터 기인된 전자회절도형이 겹쳐져서 한 영상에 나타나도록 한 것이다. Fig. 3(d)로부터 사파이어 C면 위에 Wurtite 형태의 GaN epilayer가 <0001> 방향으로 epitaxial하게 자라난 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 3(b)와 3(c) 영상들의 경계면으로부터 얻은 전자회절도형은 전술 했듯이 여러 성장면이 서로 경쟁적으로 자라나고, 또한 C면과 비교하여 많은 결함들을 내재하고 있기때문에, 매우 복잡한 형태의 수많은 점들이 발견되어지고 희미한 한 형태의 회절도 관찰되어지는바 결정학적인 해석이 불가능하여 본 논문에서 게재하지 않았다. A면과 R면에서 자란 GaN 시편에서 이렇게 복잡한 회절도형이 관찰되는 이유는 적어도 3개 이상의 성장방향을 가지고 서로 경쟁적으로 자라난다는 앞에서의 설명을 뒷받침해 주는 증거라고도 말할 수 있다.

투과전자현미경 영상과 해당 회절도형(Fig. 3(d))을 통해 얻을 수 있는 사실은 같은 증착조건 아래에서 사파이어 {0001}면을 사용한 경우 buffer layer의 도입 없이도 가장 우수한 hetero-epitaxial GaN를 얻을 수 있었고, {1120}면과 XRD 분석결과에 의해서는 epilayer의 존재를 확인 할 수 없었던 {1102}면 위에서도 {0001}면 위에 증착된 GaN epilayer와 같은 질은 아니지만 TEM으로 GaN lattice를 관찰 할 수 있을 정도의 epilayer를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

4. 결 론

다른 많은 GaN 연구자들에 의해 여러 가지 방법으로 예측된 사파이어 위에 키운 GaN epilayer의 질을 본 연구에서는 TEM을 사용하여 고분해능 영상과 전자회절도형으로 확인한 것에 본 논문의 의의가 있다고 할 수 있다. 본 연구를 통하여 예측만 되어왔던 3가지 기판 방향성을 가지는 사파이어 위에 증착된 GaN epilayer의 경계면을 고분해능 영상으로 비교 관찰 할 수 있었고 전자회절도형의 분석으로부터 우선 성장방향을 알아내었다.

본 연구에서는 증착시 기판온도 650~850°C의 온도범위에서 buffer layer의 도입 없이 세 가지 서로 다른 방향성을 가진 사파이어 C, A, R 기판위에 GaN를 OMVPE 방식으로 증착시켰다. 사파이어 {0001} 기판을 사용한 경우에 hetero-epitaxial한 GaN층을 얻을 수

있었고 내부결함 및 경계면의 결함도 찾아보기 힘든, 미세구조적으로 거의 완벽한 epilayer를 얻을 수 있었다. 이 경우 GaN의 주 성장 방향은 <0001>이었다. 사파이어 {11 $\bar{2}$ 0} 기판을 사용한 경우에는 여러 가지 방향성을 가진 epilayer들이 서로 경쟁적으로 성장한 GaN층이 발견되어졌고, 결함들도 상대적으로 많이 내재되어 있었다. 이들 시편으로부터 얻은 매우 복잡한 형태의 전자회절도형은 이러한 경쟁적인 성장으로 인한 여러 가지 방향성을 가지는 증착층의 존재를 뒷받침 한다. 사파이어 {1 $\bar{1}$ 02} 기판을 사용한 시편의 경우도 전자회절도형은 {11 $\bar{2}$ 0} 기판 시편과 유사하였고 시편준비의 제한성 때문에 정대축을 잡지 못하여 정확한 고분해능 영상을 얻을 수는 없었으나, 부분적인 epilayer의 존재를 확인할 수 있었고 후후 {1 $\bar{1}$ 02} 기판 시편에 대한 보다 심도있는 관찰이 요구되어진다.

결정특성만을 고려할 때 다른 연구자들이 예측하였듯이 가장 결함이 없고 주 성장방향을 뚜렷이 가지는 GaN epilayer는 역시 사파이어 C면에서 얻어질 수 있다는 사실을 TEM을 이용하여 확인할 수 있었고, A면과 특히 epilayer를 얻기 힘든 것으로 알려지고 있는 R면에서도 결정의 질은 떨어지고 결함이 많기는 하지만 여러 가지 결정성장 방향을 가지는 GaN층을 얻을 수 있다는 사실도 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 96년도 과학재단 특정연구과제 분야(과제 번호: 96-0300-14-01-3) 지원 연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] I. Akasaki and H. Amano, J of Crystal Growth 146 (1995) 455.
- [2] T. Detchprohm, K. Hiarmatsu, N. Sawaki and I. Akasaki, J. of Crystal Growth 137 (1994) 170.
- [3] R.L. Moon and Yu-Min Hong, Chemical Vapor Deposition Principles and Applications, Ed. M. L. Hitchman (Academic Press, 1993) pp. 245-348.
- [4] S. Nakamura, J. of Crystal Growth 145 (1994) 911.
- [5] S. Strite and H. Morkoc, J. Vac. Sci. Technol. B 10(4) (1992) 1237.
- [6] 김선태, 문동찬, 한국재료학회지 5(4) (1995) 420.
- [7] T. Matsuoka, A. Ohki, T. Ohno and Y. Kawaguchi, J. of Crystal-Growth 138 (1994) 727.
- [8] J.N. Kuznia, M.A. Khan and D.T. Olson, J. Appl. Phys. 73(9) (1993) 4700.
- [9] A. Yamamoto, M. Tsujino, M. Ohkubo and A. Hashimoto, J. Crystal Growth 137 (1994) 415.
- [10] R.F. Davis, Physica B 185 (1991) 1.
- [11] 이철수, 물리학과 첨단기술 12 (1994) 32.
- [12] P. Kung, A. Saxler, X. Zhang, D. Walker, R. Lavado and M. Razeghi, Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 2116.
- [13] W. Van der Stricht, I. Moerman, P. Demeester, J.A. Crawley and E.J. thrush, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1 (1996) 3.
- [14] M.A.L. Johnson, S. Fujita and W.H. Rowland, Sol. St. Electr. 41 (1997) 213.
- [15] M. Sato, Appl. Phys. Lett. 68(7) (1986) 935.
- [16] J.S. Hwang, A.V. Kuznetsov, S.S. Lee, H.S. Kim, J.G. Choi and P.J. Chong, J. Crystal Growth 142 (1994) 5.
- [17] E.S. Hellman, Z.L. Weber and D.N.E. Buchanan, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 2 (1997) 30.
- [18] S. Christiansen, M. Albrecht, W. Dorsch, H.P. Strunk, C. Zanotti-Fregonara, G. Salviati, A. Pelzmann, M. Mayer, Markus Kamp and K.J. Ebeling, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1 (1996) 19.
- [19] Carol Trager-Cowan, S. McArthur, P.G. Middleton, K.P. O'Donnell, D. Zubia and S.D. Hersee, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3 (1998) 36.
- [20] E.L. Piner, F.G. McIntosh, J.C. Roberts, M.E. Aumer, V.A. Joshkin, S.M. Bedair and N.A. El-Masry, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1 (1996) 43.
- [21] Y. Kim, PhD Dissertation (1991).
- [22] Y. Kim and T. Hsu, Surface Sci. 258 (1991) 131.
- [23] 김유탉, 박진호, 신건철, 한국결정성장학회지 8(3) (1998) 377.