

HVPE법을 이용하여 PSS와 AlN Buffered PSS 위에 성장시킨 GaN 박막의 결정 특성

이원준¹, 박미선¹, 이원재¹, 김일수^{1,a}, 최영준², 이해용²

¹ 동의대학교 신소재공학과

² (주)루미지엔테크

Crystalline Properties of GaN Layers Grown on PSS and AlN Buffered PSS by HVPE Method

Won Jun Lee¹, Mi Seon Park¹, Won Jae Lee¹, Il Su Kim^{1,a}, Young Jun Choi², and Hae Yong Lee²

¹ Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

² LumiGNtech Co., Ltd., Gwangmyeong 14322, Korea

(Received July 20, 2018; Revised July 31, 2018; Accepted August 14, 2018)

Abstract: An epitaxial GaN layer was grown on a cone-shape-patterned sapphire substrate (PSS) (Sample A) and an AlN-buffered PSS (Sample B) with two growth steps under the same process conditions by employing the hydride vapor phase epitaxy (HVPE) method. We have investigated the characteristics of the GaN layer grown on two kinds of substrates at each growth step. The cross-sectional SEM image of the GaN layer grown on the two types of substrates showed growth states of GaN layers formed during the 1st and 2nd growth steps with different growth durations. Dislocation density was obtained by calculation using the FWHM value of the rocking curve for (002) and (102). Sample A showed $2.62+08E$ and $6.66+08E$ and sample B exhibited $5.74+07E$ and $1.65+08E$ for two different planes. The red shift was observed in photoluminescence (PL) analysis and Raman spectroscopy results. GaN layers grown on AlN-buffered PSS exhibited better optical and crystallographic properties than GaN layers grown on PSS.

Keywords: Patterned sapphire substrate (PSS), AlN buffered PSS, Red shift, Void

1. 서론

최근 발광 다이오드(light emitting diode, LED)에 사용되는 GaN은 고체조명 분야 외에도 생화학, 수질 및 공기 정화, 살균 및 살균과 같은 다양한 분야에서 주목을 받고 있다 [1-5]. 구조가 강하고 변환 효율이 높으며 수명이 길기 때문이다 [6,7]. 벌크 GaN 기판은

드물고 가격이 매우 비싸기 때문에 GaN 기반 LED 구조 제작 시 GaN은 일반적으로 (0001) c-plane 사파이어 기판 위에 성장된다 [8,9]. 그러나 이러한 방법은 GaN과 사파이어 기판 사이의 계면 에너지, 열팽창 계수 및 격자 상수의 차이로 인해 GaN층에서 많은 양의 전위 발생과 낮은 결정 품질을 초래한다 [10,11]. 관통 전위는 광전자 및 전자 장치에 매우 유해한 비방사 전자-정공 재조합 센터의 역할을 하게 된다 [12,13]. 또한 발생하는 결함으로 인해 누설 전류(leakage current)가 발생하여 소자의 수명과 효율을 떨어뜨리는 결과를 초래한다 [14].

이를 해결하기 위한 많은 기술들 중에서 PSS (patterned

a. Corresponding author; iskim@deu.ac.kr

sapphire substrate)를 이용한 GaN층 성장은 널리 알려진 바와 같이 광 추출 효율의 향상과 함께 관통 전위 밀도를 감소시킬 수 있기 때문에 패턴 기반 사파이어 기판(PSS)이 GaN 기반 LED에 광범위하게 사용된다.

본 연구에서는 두 단계로 이루어진 동일한 공정 조건 하에서 HVPE (hydride vapor phase epitaxy)법을 이용하여 일반적으로 사용되는 큰 형태의 PSS 기판 위에 성장된 GaN층(샘플 A라고 지칭)과 AlN buffered PSS 위에 성장된 GaN층(샘플 B)의 특성을 비교하였다. 버퍼층으로 사용한 AlN은 GaN층과 유사한 격자상수를 갖기 때문에 GaN의 결정 품질이 향상될 것으로 예상되어 적용하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 국내에서 자체적으로 제작한 수평형 HVPE를 이용하였으며, PSS와 AlN buffered PSS 위에 두 단계로 이루어진 성장 공정을 통해 GaN 층을 성장시켰다. HVPE 장비는 개별적으로 온도를 제어할 수 있는 6개의 저항 가열방식으로 온도를 제어하였으며, 내부는 소스 영역(source zone)과 성장 영역(growth zone)의 두 부분으로 이루어져 있다. 원료로 사용되는 Trimethyl gallium (TMGa) 금속은 소스 영역의 석영관 내에 위치한 석영보트 내부에 담고 온도를 800°C로 설정하였으며, 성장 영역 내에 기판이 위치하는 영역의 온도를 980°C로 설정하였다. 실험에 사용된 반응 기체는 고순도 암모니아와 고순도 염화수소를 사용하였으며, 캐리어 가스로는 질소를 사용하였다.

본 연구의 성장 조건은 선행된 실험 [15]에서 최적화되었다. 성장 공정은 두 단계로 이루어지는데, 첫 번째 성장 단계에서는 높은 V/III족 비율로 성장하고 두 번째 성장 단계에서는 낮은 V/III족 비율로 성장시켰다. 또한 본 연구에서는 두 가지 종류의 실험을 수행했다. (1) 첫 번째 성장 단계를 이용하여 1분에서 5분까지 5가지 성장 시간 동안 각각의 기판 위에 GaN층을 성장시켰다. (2) 첫 번째 성장 단계로 5분 동안 성장시킨 후 연속적으로 10분 동안 두 번째 성장 단계를 이용하여 각각의 기판 위에 성장시켰다.

표 1에는 본 실험에서 이용한 각 단계별 성장 조건을 나타내었다. AlN buffered PSS는 Kyma Technologies사에서 우리가 제공한 PSS 위에 plasma vapor deposition of nanocolumns (PVDNCTM)를 이용하여 25 nm 두께를 갖는 AlN 완충층을 증착시킨 뒤 본 실험에 사용하였다.

Table 1. The growth conditions for the GaN layers on PSS and AlN buffered PSS.

| Growth temperature | Growth step | Source HCl (sccm) | NH ₃ (sccm) | V/III ratio | Growth time (min.) |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-------------|--------------------|
| 980°C | 1 st | 100 | 3,000 | 30 | 5 |
| | 2 nd | 300 | 900 | 3 | 10 |

3. 결과 및 고찰

그림 1에는 본 실험에 사용한 기판구조를 살펴보기 위하여 SEM을 이용하여 각각의 기판에 형성된 패턴의 높이, 지름 및 패턴들 사이의 간격을 측정하였으며, XRD를 이용하여 기판의 상 분석 결과를 나타내었다. AlN buffered PSS 기판에서는 PSS 기판과는 달리 AlN 상의 피크가 관찰되어 AlN층이 안정적으로 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

첫 번째 성장 단계만을 이용하여 1분, 3분, 5분 동안 PSS와 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN층의 SEM 이미지를 그림 2와 3에 각각 나타내었다. 1분간 성장시킨 경우 PSS와 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN층은 그림 2(a), (d) 그리고 그림 3(a), (d)와 같이 패턴과 패턴 사이에서 c-direction으로 우선적인 성장이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 sapphire와 AlN의 표면 에너지 차이에 기인하는 것으로 설명된다. 사파이어의 경우 c-plane과 r-

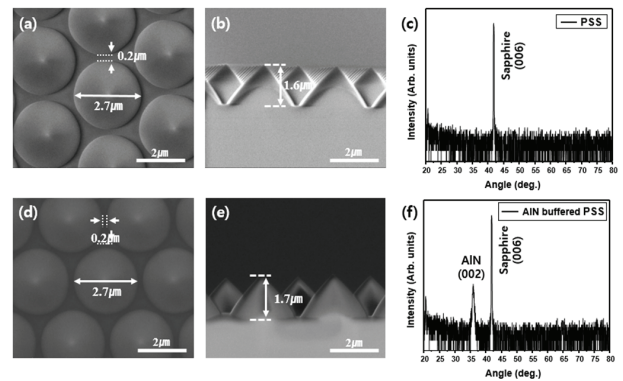


Fig. 1. SEM image and XRD phase analysis of PSS and AlN buffered PSS used in the experiment. (a) Top-view of PSS, (b) cross-sectional view of PSS, (c) PSS data of XRD phase analysis, (d) top-view of AlN buffered PSS, (e) cross-sectional view of AlN buffered PSS, and (f) AlN buffered PSS data of XRD phase analysis.

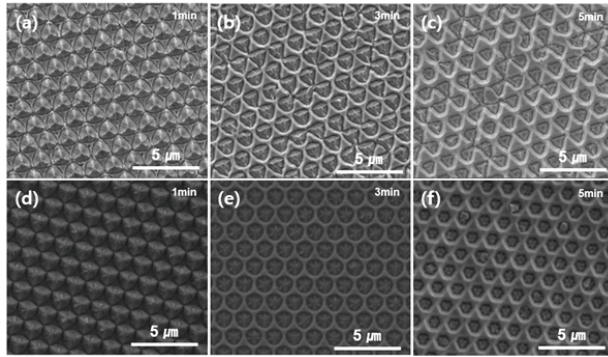


Fig. 2. Top-view SEM images of according to different growth time of GaN layers grown on each substrate. (a) Grown on PSS for 1 minutes, (b) grown on PSS for 3 minutes, (c) grown on PSS for 5 minutes, (d) grown on AlN buffered PSS for 1 minute, (e) grown on AlN buffered PSS for 3 minutes, and (f) grown on AlN buffered PSS for 5 min.

plane의 표면 에너지는 각각 7.4 J/m^2 과 5.9 J/m^2 이고 [16] AlN의 c-plane, m-plane 그리고 a-plane의 표면 에너지는 각각 6.31 J/m^2 , 4.81 J/m^2 그리고 4.97 J/m^2 이다 [17]. 그러므로 표면 에너지가 높기 때문에 상대적으로 불안한 사파이어와 AlN의 c-plane이 안정화되기 위하여 sapphire의 r-plane 또는 AlN의 m-, a-plane보다 더 불안정한 c-plane에서 우선적인 성장이 일어난다.

그림 2(b), (e) 그리고 그림 3(b), (e)와 같이, 3분간 성장시킨 경우에는 c-direction뿐만 아니라 slope-direction으로 성장이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(c), (f) 그리고 그림 3(c), (f)와 같이 5분간 성장시킨 경우 slope-direction의 성장이 3분간 성장시켰을 때와 비교하여 더 이상 진행되지 않았고 오직 c-direction으로만 진행된 것을 확인할 수 있다. 또한 PSS와 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN는 성장 시간이 증가할수록 c-plane으로 성장한 GaN의 형상에 차이가 생기는데, PSS 위에 성장된 GaN의 경우에는 삼각형 모양으로 성장되고 AlN buffered PSS 위에 성장된 GaN은 육각형 모양으로 성장된다.

성장시간에 따른 광학적 특성의 변화를 알아보기 위하여 PL 분석을 실시하였다. 그 결과 PSS 위에 성장시킨 GaN의 경우 1분간 성장시켰을 때 3.39 eV에서 피크가 나타나지만 성장 시간이 증가함에 따라 피크가 적색편이 되어 5분간 성장시켰을 때는 3.36 eV에서 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 AlN

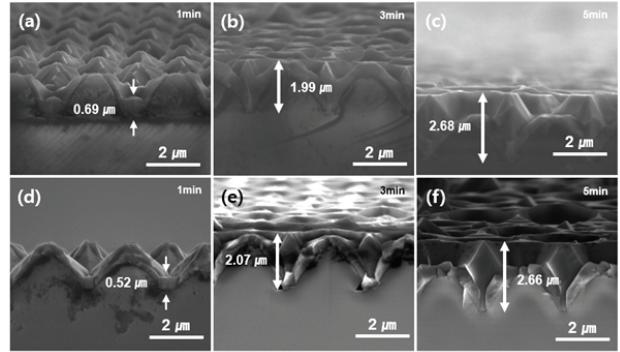


Fig. 3. Cross-sectional SEM images of according to different growth time of GaN layers grown on each substrate. (a) Grown on PSS for 1 minutes, (b) grown on PSS for 3 minutes, (c) grown on PSS for 5 minutes, (d) grown on AlN buffered PSS for 1 minute, (e) grown on AlN buffered PSS for 3 minutes, and (f) grown on AlN buffered PSS for 5 min.

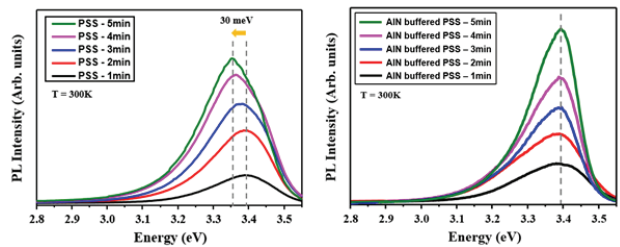


Fig. 4. PL spectra at room temperature (300 K) with increasing growth time of GaN layers on PSS and AlN buffered PSS in 1st growth step.

buffered PSS 위에 GaN를 성장시킨 경우에도 1분간 성장시켰을 때는 3.39 eV에서 피크가 나타나지만, 이후 성장 시간이 증가하여도 피크의 강도가 증가하는 현상 이외에는 어떠한 변화도 없다는 것을 확인할 수 있다. 이는 PSS의 패턴을 이루는 물질인 사파이어는 AlN buffered PSS의 패턴 위에 증착된 AlN보다 GaN와 격자상수 차이가 더 크기 때문에 더 많은 응력이 발생하고, 이를 해소하기 위하여 성장 시간이 증가함에 따라 더 많은 전위들이 발생하고 그로 인한 영향이 PSS 위에 성장시킨 GaN에 작용하는 것으로 판단된다.

각 기판 위에 성장된 GaN의 결정학적 특성을 비교하기 위하여 HR-XRD를 이용하여 (002)와 (102)에 대한 rocking curve의 FWHM 값을 측정하였다. 또한 FWHM 값을 이용하여 칼날전위 밀도와 나선전위 밀도를 계산 [18]하였으며, 계산 결과는 표 2에 나타내었다.

Table 2. TFWHM values of rocking curves for (002) and (102) of GaN layers grown on PSS and AlN buffered PSS according to different growth time and dislocation density calculated from FWHM values of rocking curves for (002) and (102).

| Sample | FWHM of rocking curve (arcsec) | | Dislocation density | |
|-------------------------|--------------------------------|-------|---------------------|----------|
| | (002) | (102) | Edge | Screw |
| PSS-1 min. | 1,848 | 1,931 | 6.86E+09 | 1.98E+10 |
| PSS-2 min. | 2,135 | 2,360 | 9.16E+09 | 2.96E+10 |
| PSS-3 min. | 2,455 | 2,615 | 1.21E+10 | 3.63E+10 |
| PSS-4 min. | 1,944 | 2,281 | 7.60E+09 | 2.76E+10 |
| PSS-5 min. | 1,731 | 1,851 | 6.02E+09 | 1.82E+10 |
| AlN buffered PSS-1 min. | 1,158 | 987 | 2.70E+09 | 5.11E+09 |
| AlN buffered PSS-2 min. | 797 | 957 | 1.28E+09 | 4.87E+09 |
| AlN buffered PSS-3 min. | 480 | 699 | 4.63E+08 | 2.61E+09 |
| AlN buffered PSS-4 min. | 412 | 645 | 3.41E+08 | 2.21E+09 |
| AlN buffered PSS-5 min. | 333 | 492 | 2.23E+08 | 1.29E+09 |

또한 성장 시간이 증가함에 따라 응력의 변화를 알아보기 위하여 그림 5와 같이 Raman 분석을 실시하였다. 앞선 결과와 마찬가지로 두 기판 위에 성장시킨 모든 GaN에서 $A_1(TO)$, $E_2(\text{high})$, $A_1(LO)$ 피크가 나타났다. PSS 위에 1분간 GaN를 성장시킨 경우 $E_2(\text{high})$ 피크는 570.1 cm^{-1} 에서 나타났지만, AlN buffered PSS의 경우에는 568.4 cm^{-1} 에서 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 기판 위에서 GaN를 1분간 성장시켰을 때 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN가 PSS 위에 성장시킨 GaN보다 더 적은 잔류 인장 응력을 갖는 것으로 확인된다. 성장 시간이 증가함에 따라 각 기판 위에서 성장된 GaN 모두 적색편이가 일어나는 것을 확인할 수 있으며, 5분간 성장시켰을 때 PSS와 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN의 $E_2(\text{high})$ 피크는 각각 568.5 cm^{-1} 와 568.2 cm^{-1} 에서 나타나며, 적색편이의 정도는 PSS 위에 성장된 GaN가 더 크기 때문에 잔류 인장 응력은 AlN buffered PSS 위에 성장된 GaN가 더 적게 받는 것으로 확인되었다.

그림 6의 SEM 단면 이미지를 통해 샘플 A (GaN on PSS)와 샘플 B (GaN on AlN buffered PSS)에서 패턴 근처의 void의 형성의 유무를 확인할 수 있었으며, 샘플 B에서는 void가 형성되지 않음을 알 수 있다. 패턴

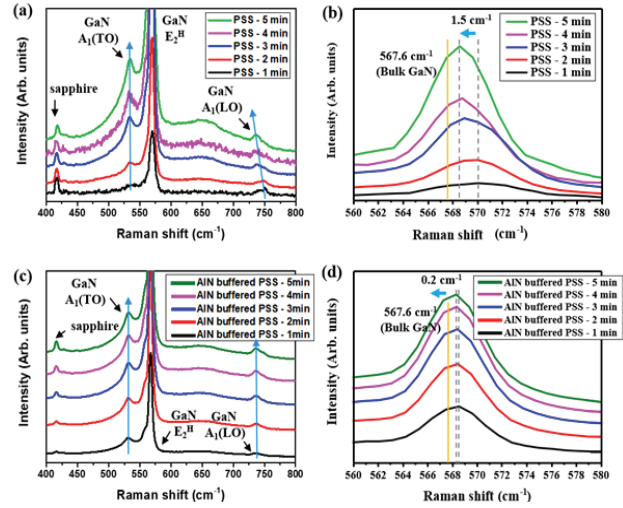


Fig. 5. Raman spectra of GaN layers grown on PSS and AlN buffered PSS according different growth times: (a) for GaN layers grown on PSS, (b) close up $E_2(\text{high})$ peak from 560 to 580 cm^{-1} at Raman spectra of (a), (c) for GaN layers grown on AlN buffered PSS, and (d) close up $E_2(\text{high})$ peak from 560 to 580 cm^{-1} at Raman spectra of (C).

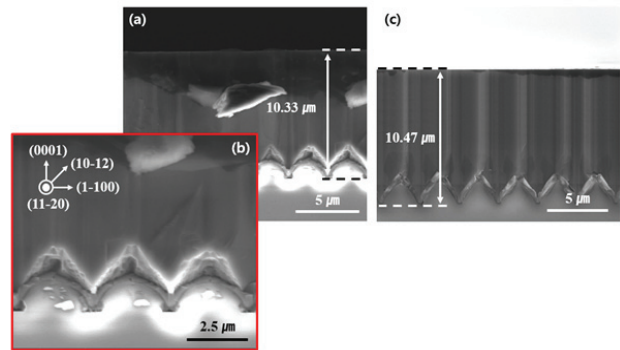


Fig. 6. SEM cross-sectional images of GaN layers after the 2nd growth step on each substrate. (a) GaN on PSS, (b) magnified of (a), and (c) GaN on AlN buffered PSS.

과 패턴 사이에서 성장된 GaN의 형상이 AlN buffered PSS 위에 성장시켰을 때와 같이 육각형일 때는 PSS 위에 성장시켰을 때와 같이 삼각형일 때보다 m -plane 과 같은 측면 방향으로 성장이 가능한 면을 더 많이 가지고 있기 때문에 횡축 방향으로의 성장이 더 빠르며 그로 인해 샘플 B가 더 빠른 횡축 성장 속도를 가진다. 이후 빠른 횡축 성장 속도로 인하여 패턴 위쪽 영역에서 void가 형성되지 않는 것으로 판단된다.

앞서 샘플 A (GaN on PSS)와 샘플 B (GaN on AlN

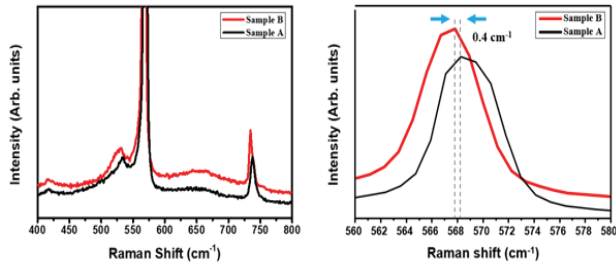


Fig. 7. Raman spectra of GaN layers grown on each substrate after the 1st and 2nd growth step. (a) Raman spectra from 400 to 800 cm⁻¹ and (b) Close up E₂(high) peak from 560 to 580 cm⁻¹.

buffered PSS)에 대한 분석 결과들을 바탕으로 성장된 GaN층에 대한 응력의 변화를 알아보기 위하여 Raman 분석을 실시하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7과 같이 샘플 A와 샘플 B 모두 A₁(TO), E₂(high), A₁(LO) 피크가 관찰된다. 그러나 샘플 A의 경우 모든 피크들이 샘플 B보다 적색편이 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 샘플 A보다 샘플 B가 더 적은 잔류 인장 응력을 받고 있다는 것을 의미한다. 또한 그림 7(b)에 정확한 E₂(high) 피크에 대한 값을 확인하기 위하여 E₂(high) 피크 영역만을 확대하여 나타내었다. 샘플 A의 경우 568.2 cm⁻¹, 샘플 B의 경우 567.8 cm⁻¹에서 피크가 나타나며, 샘플 A가 샘플 B보다 0.4 cm⁻¹만큼 더 적색편이 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 패턴 위에 공동이 형성되지 않았음에도 샘플 B가 더 적은 압축응력을 받는다는 것을 확인할 수 있으며, 사파이어보다 더 적은 격자상수 차이를 갖는 AlN buffered PSS의 패턴에 기인하는 것으로 판단된다.

또한 샘플 A와 샘플 B의 (002)와 (102)에 대한 rocking curve의 FWHM 값을 측정하였고, 측정된 FWHM 값을 이용하여 칼날전위와 나선전위에 대한 전위 밀도를 계산하였으며, 그 결과를 그림 8과 표 3에 나타내었다. 그림 8에 나타난 바와 같이 각 샘플의 (002)와 (102)에 대한 rocking curve의 FWHM 값은 샘플 A의 경우 361 arcsec와 354 arcsec, 샘플 B의 경우 169 arcsec와 176 arcsec로 측정되었다. 또한 이를 이용하여 칼날전위 밀도와 나선전위 밀도를 계산한 결과 샘플 A의 경우 2.62E+08과 6.66E+08, 샘플 B의 경우 5.74E+07과 1.65E+08로 계산된다. 이는 AlN가 사파이어보다 GaN와의 격자상수 차이가 더 작기 때문이며, 결과적으로 PSS 위에 성장시킨 GaN보다 AlN buffered PSS 위에 성장시킨 GaN이 더 좋은 결정질을 갖는 것으로 확인되었다.

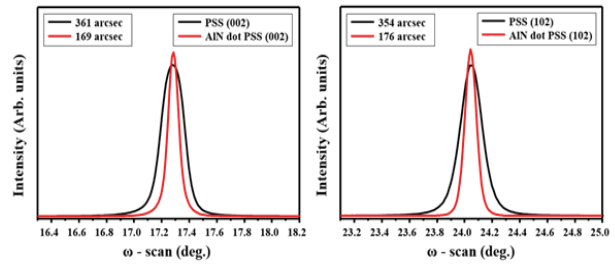


Fig. 8. FWHM values of XRD with (002) and (102) rocking curves for sample A (GaN on PSS) and B (GaN on AlN buffered PSS).

Table 3. FWHM values and dislocation density of rocking curves for (002) and (102) of sample A and B.

| Sample | FWHM of rocking curve (arcsec) | | Dislocation density | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|---------------------|----------|
| | (002) | (102) | Edge | Screw |
| GaN on PSS (sample A) | 361 | 354 | 2.62E+08 | 6.66E+08 |
| GaN on AlN buffered PSS (sample B) | 169 | 176 | 5.74E+07 | 1.65E+08 |

4. 결론

HVPE에 의해 동일한 성장 조건하에서 PSS 및 AlN buffered PSS 상에 성장된 GaN층의 특성을 비교하였다.

전체적인 성장 공정은 각각의 기판 위에 동일한 조건하에서 V/III족 비율이 다른 두 가지 성장 단계로 구성된다. AlN buffered PSS 상에 성장된 GaN층은 PSS 위에 성장된 GaN층보다 우수한 광학적 특성, 결정 품질 그리고 낮은 결함 밀도를 가진 것으로 드러났다. PL을 이용한 광학적 특성 분석 결과 PSS 위에 성장된 GaN층은 red shift가 발생하였으나 AlN buffered PSS 위에 성장된 GaN층의 경우에는 적색편이가 발생하지 않았다. XRD를 이용하여 AlN buffered PSS 위에 성장된 GaN층의 (002)와 (102)에 대한 rocking curve의 FWHM과 칼날전위와 나선전위에 대한 전위 밀도를 계산한 결과 각각 169 arcsec와 176 arcsec 그리고 5.74E+07과 1.65E+08으로 나타났다.

또한 AlN buffered PSS는 첫 번째 성장단계 직후 육각형의 표면 형상을 갖는다. 이로 인해 횡축으로 성장할 수 있는 면이 PSS보다 더 많기 때문에 더 빠른 속도로 횡축 성장이 일어나며 패턴 위에 void가 발생

하지 않는 것으로 제안된다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] A. Khan, K. Balakrishnan, and T. Katona, *Nat. Photonics*, **2**, 77 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.293>]
- [2] T. H. Seo, S. Lee, K. H. Min, S. Chandramohan, A. H. Park, G. H. Lee, M. Park, E. K. Suh, and M. J. Kim, *Sci. Rep.*, **6**, 29464 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep29464>]
- [3] M. Kneissl, T. Kolbe, C. Chua, V. Kueller, N. Lobo, J. Stellmach, A. Knauer, H. Rodriguez, S. Einfeldt, Z. Yang, N. M. Johnson, and M. Weyers, *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 014036 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/1/014036>]
- [4] H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Noguchi, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki, and N. Kamata, *Phys. Status Solidi A*, **206**, 1176 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.200880961>]
- [5] Q. Dai, M. E. Foley, C. J. Breshike, A. Lita, and G. F. Strouse, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 15475 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1021/ja2039419>]
- [6] T. Mukai, S. Nagahama, M. Sano, T. Yanamoto, D. Morita, T. Mitani, Y. Narukawa, S. Yamamoto, I. Niki, M. Yamada, S. Sonobe, S. Shioji, K. Deguchi, T. Naitou, H. Tamaki, Y. Murazaki, and M. Kameshima, *Phys. Status Solidi A*, **200**, 52 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.200303326>]
- [7] T. Mukai, M. Yamada, and S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*, **38**, 3976 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.3976>]
- [8] 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**, 231 (1998). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00240-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00240-1)]
- [9] S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 427 (1983). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.93952>]
- [10] C. Sasaoka, H. Sunakawa, A. Kimura, M. Nido, A. Usui, and A. Sakai, *J. Cryst. Growth*, **189**, 61 (1998). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00169-9)]
- [11] E. V. Etzkorn and D. R. Clarke, *J. Appl. Phys.*, **89**, 1025 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1330243>]
- [12] S. Nakamura, *Science*, **281**, 956 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.281.5379.956>]
- [13] T. Sugahara, H. Sato, M. Hao, Y. Naoi, S. Kurai, S. Tottori, K. Yamashita, K. Nishino, L. T. Romano, and S. Sakai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, L398 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.L398>]
- [14] J.W.P. Hsu, M. J. Manfra, D. V. Lang, S. Richter, S.N.G. Chu, A. M. Sergent, R. N. Kleiman, L. N. Pfeiffer, and R. J. Molnar, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1685 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1356450>]
- [15] W. J. Lee, M. S. Park, W. J. Lee, Y. J. Choi, and H. Y. Lee, *J. Cryst. Growth*, **493**, 8 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.04.022>]
- [16] J. Guo, D. E. Ellis, and D. J. Lam, *Phys. Rev. B*, **45**, 13647 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.13647>]
- [17] C. E. Dreyer, A. Janotti, and C. G. Van de Walle, *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 212103 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4921855>]
- [18] C. G. Dunn and E. F. Koch, *Acta Metall.*, **5**, 548 (1957). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(57\)90122-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(57)90122-0)]