

## The effects of growth temperatures and V/III ratios at 1000°C for a-plane GaN epi-layer on r-plane sapphire grown by HVPE

Ju-Hyung Ha, Mi-Seon Park, Won-Jae Lee<sup>†</sup>, Young-Jun Choi\* and Hae-Yong Lee\*

Department of Materials and Component Engineering, Electronic Ceramics Center, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea  
\*LumiGNtech Co., Ltd., Gwangmyeong 434-050, Korea

(Received March 24, 2015)

(Revised April 10, 2015)

(Accepted April 17, 2015)

**Abstract** The effects of the growth temperature on the properties of a-plane GaN epi-layer on r-plane sapphire by HVPE were studied, when the constant V/III ratio and the flow rate of HCl for the Ga source channel was fixed at 10 and 700 sccm, respectively. Additionally the effects of V/III ratios for source gasses were studied when growth temperature and the flow rate of HCl for the Ga source channel was fixed at 1000°C and 700 sccm, respectively. As the growth temperature was increased, the values of Full Width Half Maximum (FWHM) for Rocking curve (RC) of a-plane GaN (11-20) epi-layer were decreased and thickness of a-plane GaN epi-layer were increased. As V/III ratios were increased at 1000°C, the values of FWHM for RC of a-plane GaN (11-20) were declined and thickness of a-plane GaN epi-layer were increased. The a-plane GaN (11-20) epi-layer grown at 1000°C and V/III ratio = 10 showed the lowest value FWHM for RC of a-plane GaN (11-20) for 734 arcsec and the smallest dependence of Azimuth angle for FWHM of (11-20) RCs.

**Key words** a-Plane GaN, r-Plane sapphire, HVPE

## r면 사파이어 위에 HVPE로 성장된 a면 GaN 에피층의 성장온도 효과 및 1000°C에서의 V/III족 비의 효과

하주형, 박미선, 이원재<sup>†</sup>, 최영준\*, 이해용\*

동의대학교 융합부품공학과 전자세라믹센터, 부산, 614-714

\*(주)루미지엔테크, 광명, 423-050

(2015년 3월 24일 접수)

(2015년 4월 10일 심사완료)

(2015년 4월 17일 게재확정)

**요약** Ga source 채널의 HCl flow가 700 sccm, 그리고 V/III족 비가 10으로 고정되었을 때, r-면 사파이어 위에 HVPE로 성장된 a-면 GaN 에피층 특성에 대한 성장 온도 영향을 연구하였다. 추가적으로 성장온도가 1000°C, 그리고 Ga source 채널의 HCl flow가 700 sccm으로 고정되었을 때, 공급가스에 대한 V/III족 비 영향에 대하여 연구하였다. 성장온도가 높아지면서, a-면 GaN 에피층에 대한 (11-20) 면의 Rocking curve(RC)의 반치폭 값이 감소하였고 a-면 GaN 에피층의 성장두께는 증가하였다. 1000°C에서 V/III족 비가 높아짐에 따라, (11-20) 면의 RC의 반치폭 값이 감소하였고, a-면 GaN 에피층의 성장두께가 증가하였다. 1000°C와 V/III족 비=10에서 성장된 a-면 GaN 에피층이 (11-20) 면에서 가장 낮은 RC 반치폭인 734 arcsec을 보이며, RC측정을 통한 (11-20) 면의 방위각 가장 작은 영향을 보여준다.

## 1. 서론

III족 질화물 반도체는 최근 가시영역과 자외선영역에

서 LED분야로 가지적인 성과를 내며 개발되어 왔다[1]. 0.7 eV(InN)에서 6.2 eV(AIN)에 이르는 폭넓은 밴드구조를 가지며 자외선에서 적외선 영역까지 폭 넓은 발광대역의 조절이 가능할 뿐만 아니라 고온 및 고출력에서도 안정된 동작이 가능하여 현재 LED(Light Emitting Diode) 외에 LD(Laser Diode)와 고주파 소자 응용분야에서도 개발이 되고 있다[2, 3].

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-51-890-1720

Fax: +82-505-182-6896

E-mail: leewj@deu.ac.kr

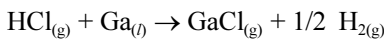
c-면 사파이어나 SiC 위에 c-면 GaN 기반의 반도체들은 최근에 가시영역과 자외선영역의 LED[4]와 LD[5], 고주파 소자[6]에 잠재적인 특성이 우수해 많은 관심을 가지고 있다. 하지만 c-면 GaN은 의도하지 않은 압전분극 현상이 발생하여, 소자로서 효율을 감소시키는 문제가 대두되고 있다[7, 8]. 이 부분을 극복하기 위해, m-면 SiC, r-면 사파이어와 LiAlO<sub>2</sub> 기판 위에 non-polar로 성장된 GaN이 LED의 양자효율을 개선시켜 활발히 연구되어왔다[9].

현재 r-면 사파이어 위에 성장된 a-면 GaN 에피층의 표면은 매우 거칠어 소자로 제조하는 것에 대해 어려움이 있다. 이로 인해 a-면 GaN위에 소자로 만드는 것이 어려웠다[10-12].

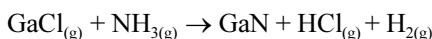
본 연구에서는 성장온도변화와 V/III족 비의 변화에 따른 r-면 사파이어 위에 HVPE로 성장한 a-면 GaN 에피층의 결정학적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험방법

본 논문은 a-면 GaN 에피층을 성장하기 위해 국내에서 자체 제작된 수평형 수소기상화합물 증착(Hydride Vapor Phase Epitaxy(HVPE))장비에서 성장시켰다. HVPE 장비는 소스영역(source zone)과 성장영역(growth zone)의 두 부분으로 구성되어 있다. 먼저 소스영역에서 지배적으로 일어나는 반응은 아래와 같은 반응식으로 설명된다.



생성된 GaCl은 캐리어 가스인 질소(N<sub>2</sub>)와 함께 성장 영역으로 이동된다. 이 후 성장영역에서는 r-면 사파이어 위에 a-면 GaN 에피층의 성장이 이루어진다. 소스영역에서 형성된 GaCl이 분리된 관으로 공급된 NH<sub>3</sub>와 반응하게 되는데, 이 성장영역에서 지배적으로 일어나는 반응은 아래와 같은 반응식으로 설명된다. GaN 외에 형성되는 부산물들은 캐리어 역할을 하는 N<sub>2(g)</sub>와 함께 정화 장치를 거쳐서 장비 외부로 배출된다.



위 공정은 상압에서 진행되었으며, 활성가스(Active gas)는 고순도 HCl과 NH<sub>3</sub>를 사용하였고, 3족 원료로는 Ga 금속을 사용하였다. 소스영역에 Ga 금속을 넣어 분리된 석영관 내에 위치시키고, 온도는 800°C로 설정하였다. 성장영역에서 r-면 사파이어가 위치하고, Table 1에서 설정된 3가지 성장 온도로 실험을 진행하였다.

본 실험에서 성장한 모든 시료들에 대한 성장조건은 Table 1과 같다. 또한, 실험에 사용된 기판은 c-축에서 0°로 잘려진 r-면 사파이어를 사용하였다. 시료들의 성장

Table 1  
Growth conditions with growth temperature and the different V/III ratios 3, 5 and 10

No.	Growth temperature (°C)	HCl : NH <sub>3</sub> (sccm)	V/III ratio
# 1	980	700:7000	10
# 2	990	700:7000	10
# 3		700:2100	3
# 4	1000	700:3500	5
# 5		700:7000	10

시간은 모두 일정하게 10분 동안 성장하였다. 고정된 V/III족 비가 10(HCl : NH<sub>3</sub> = 700 : 7000)의 동일 조건에서 성장온도를 980°C와 990°C, 1000°C로 변화시키며 실험을 실시하였다. 추가로 1000°C일 때, Ga source 채널의 HCl공급량을 700 sccm으로 고정한 조건에서, NH<sub>3</sub>의 공급량을 변화시켜 V/III족 비를 3, 5, 10로 조절하여 실험을 실시하였다.

성장 후, 모든 시료에 대한 분석은 광학현미경(Optical Microscope(OM), Model 80i, Nikon, Japan)과 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope(AFM), Seiko, SPA-400, Japan) 장비를 이용하여 표면을 분석하였고, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope(SEM), FEI, Quanta 200 FEG FE-SEM, Japan) 장비를 이용하여 성장된 a-면 GaN 에피층의 두께를 측정하기 위하여 단면을 관찰하였다.

고 분해능 엑스선 회절장비를 이용하여 시료의 결정성 분석을 Omega scan 및 2theta-theta scan으로 측정하였다. 먼저 Omega scan을 하여 얻을 수 있는 Rocking Curve(RC)측정은 반치폭 값을 얻을 수 있는데, 시료의 c-축 방향과 엑스선의 입사방향을 평행으로 맞춘 후 반치폭 값을 측정하였다. 반치폭 값이 상대적으로 낮은 시료 #1, #2, #5에 한하여 시료를 phi scan시켜, 방위각에 따른 반치폭 값의 변화를 관찰하였다. Phi 방향으로 0~360° 구간을 회전하여 30°마다 반치폭 값을 측정하여 비교하여, 방위각에 대한 의존성 분석을 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

HCl과 NH<sub>3</sub>의 유량 비율인 V/III족 비가 10에서 성장 온도변화에 따른 a-면 GaN 에피층의 특성을 보기 위하여, 980°C, 990°C와 1000°C에서 성장된 시료 #1, #2와 #5를 먼저 비교하였다. Fig. 1에서 a-면 GaN 에피층의 표면 거칠기 값(Ra)과 성장속도를 비교하였다. 온도 높아짐에 따라 성장속도는 증가하고 있으며, 특히 1000°C에서 성장된 시료 #5가 990°C에서 성장된 시료 #2와 비교하였을 때보다 더 빠르게 성장된 것을(시료 #5의 성장속도가 2.171 μm/min으로 시료 #2에 비하여 약 60%

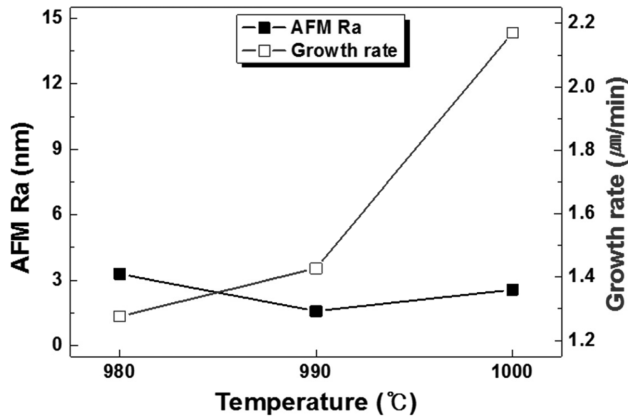


Fig. 1. The plot of surface roughness (Ra) and growth rate at different temperatures.

증가) 알 수 있다. 본 실험에서는 성장온도가 980°C에서 990°C로 높아짐에 따라 시료 #3에서 1.579 nm로 나타나 표면 거칠기가 가장 작았고, 성장 온도가 1000°C인 #5의 표면 거칠기 값은 2.563 nm로 다시 증가하였다. 이는 시료 #5 a면 GaN의 성장속도가 급격하게 증가하여 표면 거칠기 값이 증가된 것으로 볼 수 있다.

성장온도에 따른 실험에 대하여, a-면 GaN 에피층의 표면 사진(OM과 AFM)과 단면 사진(SEM)을 Fig. 2에 보여주고 있다. AFM으로 측정된 3D scan결과에서 표면 형상의 차이가 확인되는데, 980°C에서 성장된 시료 #1은 표면에서 줄무늬가 보이고 있다. 이 줄무늬는 Y.

H. Wu 등이 발표한 a-면 GaN의 표면과 같은 형상으로 알 수 있다. a-면 GaN의 단결정이 성장되는 방법으로 인해 생기는데, 시료 #1과 #2는 시료 #5에 비하여 성장속도가 낮기 때문에 줄무늬가 생겨있었던 것으로 볼 수 있다[13, 14].

성장온도가 증가할수록 표면의 줄무늬의 수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. K. Kusakabe 등이 보고한 논문을 인용하면, 표면 형태는 성장온도가 높아지면서 a-면 GaN의 성장방향에 영향이 미치게 된다. 성장온도가 높아지면 a-면 GaN의 [0001] 방향보다 [-1100] 방향이 더 빠르게 성장된다. 본 실험에서도 같은 효과가 발생하는데, 1000°C에서 성장한 시료 #5가 980°C에서 성장한 시료 #1보다 [-1100] 방향으로 빠르게 성장하였다. 이 때문에 성장온도가 높아질수록 표면 위에 줄무늬가 감소하였고, 동시에 표면 거칠기 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다[15].

일정한 V/III족 비가 10(= 700 : 7000)일 때, 온도변화에 따른 a-면 GaN 에피층의 두께와 (11-20) 면에 대한 RC의 반치폭 값을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 980°C와 990°C에서 성장된 시료 #1과 #2에서, a-면 GaN 에피층의 (11-20) 면에 대한 RC 반치폭 값은 829와 832 arcsec로 큰 변화가 없었다. 하지만 1000°C에서 성장된 a-면 GaN (11-20) 면에 대한 RC의 반치폭 값은 734 arcsec로 가장 낮은 값을 가졌다(Table 2에 측정된 값 정리). 즉 성장온도가 높아지면서, a-면 GaN 에피층의 (11-20) 면에

Sample No. (Temp.)	HCl:NH <sub>3</sub> =700:7000		
	OM (×100)	AFM (5 × 5 μm <sup>2</sup> )	SEM (×5000)
#1 (980°C)			
#2 (990°C)			
#5 (1000°C)			

Fig. 2. Surface images of OM, AFM 3D and cross-sectional images of SEM.

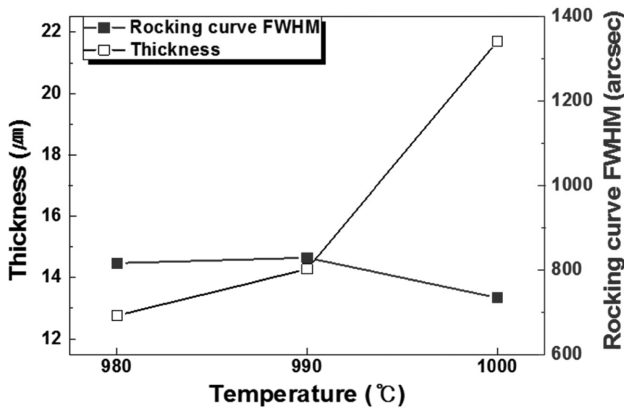


Fig. 3. The plot of thickness and rocking curve FWHM at different temperatures.

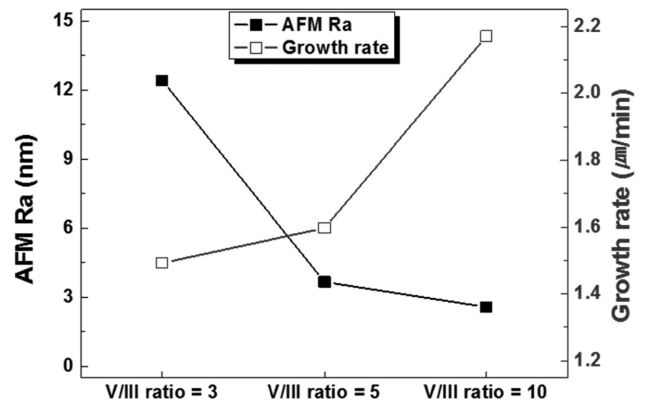


Fig. 4. The plot of Ra and growth rate at different V/III ratios

Table 2  
Results of growth temperature and the different V/III ratios 3, 5 and 10

No.	AFM (nm)	Thickness (μm)	Growth rate (μm/min)	Rocking curve FWHM (arcsec)
# 1	3.287	12.764	1.276	816
# 2	1.579	14.279	1.428	829
# 3	12.410	14.920	1.492	1220
# 4	3.657	15.969	1.597	1147
# 5	2.563	21.710	2.171	734

보다 우세하게 성장하였고, 이로 인해 RC 반치폭 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 980°C와 990°C보다 1000°C에서 성장된 a-면 GaN의 두께가 크게 증가하였다. 이러한 결과는 T. S. Ko 등이 발표한 논문에서도 유사하게 언급하고 있다[16, 17].

성장온도 1000°C에서 그리고 일정한 HCl 공급량을 700 sccm를 공급할 때, V/III족 비 변화에 따른 a-면 GaN 에피층의 표면 거칠기 값과 성장속도의 변화를 Fig. 4에서 보여주고 있다. V/III족 비가 3인 시료 #3의 표면 거칠기 값이 12.410 nm로 가장 높게 측정되었고, V/III족 비가 5인 시료 #4의 표면 거칠기 값이 3.657 nm로 급격히 감소하였다. 하지만 V/III족 비가 10인 시료

대한 RC의 반치폭 값은 감소하는 경향을 보여준다. 성장온도가 높아지면서 [-1100]의 성장방향이 [0001] 방향

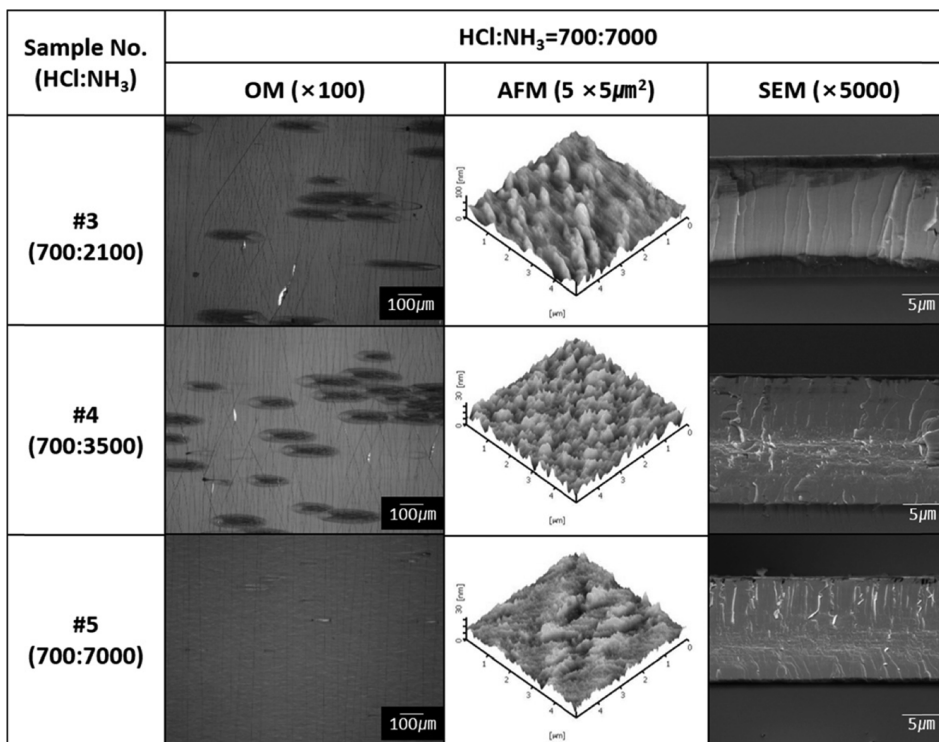


Fig. 5. Surface images of OM, AFM 3D and cross-sectional images of SEM.

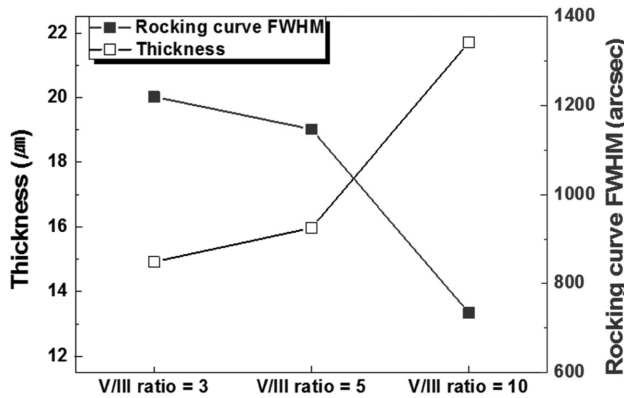


Fig. 6. The plot of thickness and rocking curve FWHM at different V/III ratios.

#5에서는 표면 거칠기 값이 2.563 nm로 다시 감소하였다. 성장속도를 비교하면, 시료 #5에서 2.171  $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 가장 빠르게 성장하였고, V/III족 비가 3과 5에 비하여 V/III족 비가 10일 때 성장속도가 30% 이상 증가되었다. 앞선 온도증가 실험과 다르게 성장속도가 높아짐에 따라 표면 거칠기 값이 감소하였다.

Fig. 5에서는 1000°C에서 V/III족 비 변화에 따른 a-면 GaN 에피층의 표면과 단면의 사진들을 보여주고 있다. 시료 #3과 #4의 표면 OM 사진에서 표면 위에 결함이 발견되었는데, Fig. 2와는 다른 경향을 보여준다. V/III족 비가 증가할수록 이 결함의 크기가 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 이 결함의 크기가 작아진 것은 V/III족의 비가 증가하면서 Ga와 N의 반응할 확률이 높아지고 동시에 성장속도가 증가하면서 결함이 작아지는 것이라 할 수 있다.

Fig. 6에서 V/III족 비 변화에 따라 성장된 a-면 GaN 에피층의 두께와 (11-20) 면에 대한 RC 반치폭 값을 보여주고 있다. S. Schwaiger 등의 논문과 유사한 결과로,  $\text{NH}_3$ 의 공급량이 증가할수록 (11-20) 면에 대한 RC 반치폭 값이 감소하여 반비례하는 경향이 나타났다[18]. Ga와  $\text{NH}_3$ 의 반응이 V/III족 비가 10일 때인 시료 #5에서 결함의 수직방향인 (-1100) 면이 빠르게 성장이 되어 다른 조건들에 비해 결함이 없었고, 동시에 RC 반치폭 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. a-면 GaN 에피층의 V/III족 비가 증가하면서 Ga와 반응할 확률이 높아져 성장 두께도 증가한 것 때문인 것으로 예측되었다.

시료 #1, #2, 그리고 #5에 대하여, 즉 온도 변화에 따라, a-면 GaN 에피층의 (11-20) 면에 대한 RC 측정값을 통한 방위각의 영향을 Fig. 7에서 보여 주고 있다. 방위각에 따라 측정된 시료는 a-면 GaN 에피층의 (0001) 면을 기준으로 하여 RC 측정을 실시하였다. 이 때 측정된 RC 반치폭 값과 측정된 각도에 대한 그래프가 a-면 GaN 에피층의 특성과 같이 'M'자로 나타내고 있음을

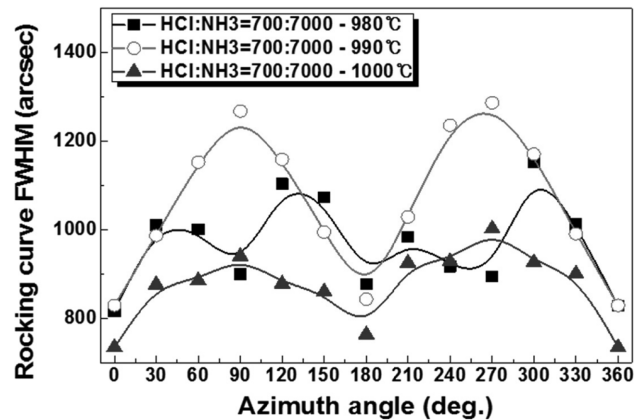


Fig. 7. Azimuth angle dependence of the FWHM of the (11-20) rocking curves for a-plane GaN epitaxial layer.

보여주고 있다[19, 20]. 하지만 T. Paskova 등의 논문에 따르면, c-면 GaN seed에서 절단 가공된 a-면 GaN기판에 성장된 a-면 에피층의 경우 일자에 가까운 특성을 갖는다고 기술하고 있다[19]. 본 실험에서 성장온도가 높아짐에 따라 a-면 GaN 에피층의 (11-20) 면에 대한 RC 반치폭 값의 차이가 감소하였고, 'M'자 형태가 일자로 변화하는 것을 Fig. 7에서 보여 주고 있다. 이러한 경향은 상기 논문에서 언급된 바와 같이, 방위각의 영향이 온도가 높아짐에 따라 감소하고 있는 것을 보여주고 있다. 1000°C에서 성장된 a-면 GaN 에피층이 다른 시료들보다 우수한 결정성을 가짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 성장온도와 1000°C에서 V/III족 비의 변화에 따라 r-면 사파이어 위에 HVPE로 성장한 a-면 GaN 에피층의 특성을 분석하였다. 먼저 성장온도 변화 실험결과, 가장 높았던 1000°C에서 성장한 시료 #5의 a-면 GaN 에피층은 다른 시료 #1과 #2와 비교하였을 때보다 a-면 GaN 에피층의 표면 거칠기 값이 두 번째로 낮은 2.563 nm이지만, 성장속도가 가장 빠르면서(2.171  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) 두껍게 성장되는 것을 확인하였다. 이와 동시에 a-면 GaN 에피층의 (11-20) 면에 대한 RC의 반치폭 값이 734 arcsec로 가장 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다.

또한 성장온도가 1000°C에서 V/III족 비 변화에 따른 실험에서는 a-면 GaN 에피층의 V/III족 비가 3일 때인 시료 #3에서 가장 낮은 값인 0.124 nm를 보여주고, 반치폭 측정 결과는 V/III족 비가 10일 때인 시료 #5에서 가장 낮게 나온 것을 확인하였다.

성장온도에 따른 실험에서 방위각에 대한 의존성 분석을 통하여, (11-20) 면에 대한 RC의 반치폭 값의 차이가 다른 시료 #1과 #2에 비해 상대적으로 낮게 측정된

1000°C에서 성장한 시료 #5의 a-면 GaN 에피층의 특성이 보다 뛰어난 것을 알 수 있었다.

## References

- [ 1 ] J.J. Jang, G.H. Yoo and O.H. Nam, "Current status of non-/semi-polar GaN based light emitting diodes", *J. Photon. Sci. Technol.* 1 (2011) 1.
- [ 2 ] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, "High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* 30 (1991) L1998.
- [ 3 ] S. Nakamura, "InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on free-standing GaN substrates", *Mater. Sci. Eng. B* 59 (1999) 370.
- [ 4 ] S.J. Pearton, J.C. Zolper, R.J. Shul and F. Ren, "GaN: Processing, defects, and devices", *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 1.
- [ 5 ] S. Nakamura and G. Fasol, "The blue laser diodes", Springer, Heidelberg (1997).
- [ 6 ] T. Palacios, L. Shen, S. Keller, A. Chakraborty, S. Heikman, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, J. Liberis, O. Kiprijanovic and A. Matulionis, "Nitride-based high electron mobility transistors with a GaN spacer", *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 073508.
- [ 7 ] T. Deguchi, K. Sekiguchi, A. Nakamura, T. Sota, R. Matsuo, S. Chichibu and S. Nakamura, "Quantum-confined Stark effect in an AlGaIn/GaN/AlGaIn single quantum well structure", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) L914.
- [ 8 ] S. Ghosh, P. Waltereit, O. Brandt, H.T. Grahn and K.H. Ploog, "Electronic band structure of wurtzite GaN under biaxial strain in the M plane investigated with photoreflectance spectroscopy", *Phys. Rev. B* 65 (2002) 075202.
- [ 9 ] J.K. Kang and Y.J. Kim, "Fabrication and characterization of tilted R-plane sapphire wafer for nonpolar a-plane GaN", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, 21(5) (2011) 187.
- [ 10 ] K. Domen, K. Horino, A. Kuramata and T. Tanahashi, "Analysis of polarization anisotropy along the c-axis in the photoluminescence of wurtzite GaN", *Appl. Phys. Lett.* 71 (1997) 1996.
- [ 11 ] P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, H.T. Grahn, J. Menniger, M. Ramsteiner, M. Reiche and K.H. Ploog, "Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes", *Nature* 406 (2002) 865.
- [ 12 ] A. Chitnis, C. Chen, V. Adivarahan, M. Shatalov, E. Kuokstic, V. Mandavilli, J. Yang and M.A. Khan, "Visible light-emitting diodes using a-plane GaN-InGaIn multiple quantum wells over r-plane sapphire", *Appl. Phys. Lett.* 84 (2004) 3663.
- [ 13 ] Y.H. Wu, C.H. Lee, C.M. Chu, Y.H. Yeh, C.L. Chen and W.I. Lee "A simple growth method to produce a-plane GaN thick films by hydride vapor phase epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (2013) 08JB08.
- [ 14 ] H.M. Wang, C.Q. Chen, Z. Gong, J.P. Zhang and M. Gaeviski, "Anisotropic structural characteristics of (110) GaN templates and coalesced epitaxial lateral overgrown films deposited on (102) sapphire", *Appl. Phys. Lett.* 84 (2004) 499.
- [ 15 ] K. Kusakabe and K. Ohkawa, "Morphological characteristics of a-plane GaN grown on r-plane sapphire by metalorganic vapor-phase epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 44(11) (2005) 7931.
- [ 16 ] T.S. Ko, T.C. Wang, R.C. Gao, H.G. Chen, G.S. Huang, T.C. Lu, H.C. Kuo and S.C. Wang, "Study on optimal growth conditions of a-plane GaN grown on r-plane sapphire by metal-organic chemical vapor deposition", *J. Cryst Growth* 300 (2007) 308.
- [ 17 ] J.-H. Ha, M.-S. Park, W.-J. Lee, Y.-J. Choi and H.-Y. Lee, "Effects of the V/III ratio on a-plane GaN epitaxial layer on r-plane sapphire grown by HVPE", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 24(3) (2014) 89.
- [ 18 ] Stephan Schwaiger, Frank Lipski, Thomas Wunderer and Ferdinand Scholz, "Influence of slight misorientations of r-plane sapphire substrates on the growth of nonpolar a-plane GaN layers via HVPE", *Phys. Status Solidi C* 7(7-8) (2010) 2069.
- [ 19 ] T. Paskova, R. Kroeger, S. Figge, D. Hommel, V. Darakchieva, B. Monemar, E. Preble, A. Hanser, N.M. Williams and M. Tutor, "High-quality bulk a-plane GaN sliced from boules in comparison to heteroepitaxially grown thick films on r-plane sapphire", *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 051914.
- [ 20 ] T. Paskova, V. Darakchieva, P.P. Paskov, J. Birch, E. Valcheva, P.O.A. Persson, B. Arnaudov, S. Tungasmitta and B. Monemar, "Nonpolar a-plane HVPE GaN growth and in-plane anisotropic properties", *J. Cryst. Growth* 281 (2005) 55.