

Characterization of α -Ga₂O₃ epilayers grown on cone-shape patterned sapphire substrate by halide vapor phase epitaxy

Hoki Son^{*,**}, Ye-Ji Choi^{*}, Young-Jin Lee^{*}, Jin-Ho Kim^{*}, Sun Woog Kim^{*}, Yong-Ho Ra^{*},
Tae-Young Lim^{*}, Jonghee Hwang^{*} and Dae-Woo Jeon^{*,†}

^{*}Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Jinju 52851 Korea

^{**}Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received July 29, 2019)

(Revised August 6, 2019)

(Accepted August 12, 2019)

Abstract In this study, we demonstrated a characterization of α -Ga₂O₃ grown on a cone-shape patterned sapphire substrate by using the halide vapor phase epitaxy. An α -Ga₂O₃ was grown on different size of PSS and c-plane sapphire substrate for comparison to confirm the effect of PSS. In addition, growth time of α -Ga₂O₃ was gradually increased to confirm growth mechanism of α -Ga₂O₃ grown on the PSS. A growth temperature was changed to 470-550°C. It can be analyzed growth conditions and mechanisms on the cone-shape PSS, resulting in a significant decrease in the FWHM value of an asymmetric plane (10-14) of α -Ga₂O₃, due to lateral growth that occurs during the growth process.

Key words α -Ga₂O₃, HVPE, PSS, Refractive index

원뿔 형태의 patterned sapphire substrate 위에 성장한 α -Ga₂O₃의 특성분석

손호기^{*,**}, 최예지^{*}, 이영진^{*}, 김진호^{*}, 김선욱^{*}, 라용호^{*}, 임태영^{*}, 황종희^{*}, 전대우^{*,†}

^{*}한국세라믹기술원, 진주, 52851

^{**}고려대학교, 서울, 02841

(2019년 7월 29일 접수)

(2019년 8월 6일 심사완료)

(2019년 8월 12일 게재확정)

요약 본 연구에서는 halide vapor phase epitaxy 성장법을 이용하여 원뿔 형태의 패턴이 주기적으로 형성된 patterned sapphire substrate(PSS) 위에 α -Ga₂O₃를 성장하고 그 특성에 변화에 대해 분석하였다. PSS의 패턴의 유무에 따른 영향을 알아보기 위해 c-plane 사파이어 기판과 원뿔의 크기가 다른 두 개의 PSS 위에 α -Ga₂O₃를 성장하여 비교 분석하였다. 또한 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃의 성장과정을 알아보기 위해 점차 성장 시간을 증가해가며 관찰하였고 성장 온도를 470-550°C까지 변화해가며 성장하였다. 이를 통해 원뿔 형태의 패턴이 형성된 PSS 위에서의 최적 성장 조건과 그 성장 mechanism에 대해 분석이 가능하였고 그 결과로 성장과정에서 발생하는 수평 성장에 의해 α -Ga₂O₃의 비대칭면인 (10-14) 반치폭 값을 크게 감소시킬 수 있었다.

1. 서론

차세대 전력반도체로 주목받고 있는 갈륨 산화물(Gallium Oxide, Ga₂O₃)은 기존의 와이드 밴드갭 물질인 GaN, SiC의 성능을 상회할 수 있는 잠재력이 있다고 평가받고 있다[1]. 또한 다수의 보고서에서 갈륨 산화물은 고전압 대전류에서 사용이 가능하고, 높은 양산성이 있

어 향후 10~20년 내에 상용화를 예상하고 있다[2,3].

갈륨 산화물은 3.4 eV보다 더 넓은 4.8~5.3 eV의 밴드갭을 가지고 있어 울트라 와이드 밴드갭(Ultra-Wide Band-gap) 반도체 물질로 구분된다. 밴드갭이 클수록 전력반도체에 매우 유리한 이점을 가진다. 고온에서 작동이 가능하고 고전압에서 견딜 수 있는 높은 항복 전압 특성을 보인다. 또한 고집적 디바이스를 제작할 수 있어 에너지 효율 증대에도 효과적이다. 전력반도체용 소재의 상대적인 우수성을 나타내는 Baliga's figure of merit(FOM)는 3000 이상으로 매우 높은 수치를 보여주고 있다[4]. 우

[†]Corresponding author
E-mail: dwjeon@kicet.re.kr

수한 특성을 기반으로 하여 UV-detector[5], Gas sensor [6], Schottky barrier diodes[7], metal oxide semiconductor field effect transistors[8] 등등 여러 분야에 응용 연구가 진행되고 있다.

갈륨 산화물은 α , β , γ , δ , ϵ 의 다섯 가지 상(phase)으로 존재한다[9]. 가장 많이 연구가 진행되고 있는 베타상은 안정한 상으로 액상 성장이 가능하여 기판 제작이 가능한 장점이 있다. 이는 호모 에피택시 성장을 하여 고품질의 박막을 얻을 수 있고 벌크 성장이 가능하여 기판 생산에 있어서 높은 가격 경쟁력을 갖는다. 이외에 준안정상으로 알려진 알파상에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 알파상은 5.3 eV의 가장 넓은 밴드갭을 가지고 있으며 비교적 고온에서도 준안정상태를 보인다. 또한 베타상과 비교하여 항복 전압과 Baliga's FOM에서 보다 높은 이론적 특성을 보이고 있다[4]. 또한 알파상은 다양한 물질과 합금이 가능하다. 인듐과 알루미늄의 합금을 통해 밴드갭을 최소 3 eV에서 최대 9 eV까지의 밴드갭 엔지니어링이 가능하여 다양한 파장에 응용이 되고 Fe, Cr, Ti, Ir 등등 전이금속과의 합금을 통해서 기능성 엔지니어링도 가능하다[10].

하지만 이론에 의하면 알파상은 액상 성장이 불가능하고 오로지 헤테로 에피택시 성장만 가능하다. 준안정상인 알파상은 고온이 가해지면 안정상인 베타상으로 상변화가 발생되므로 알파상의 녹는점은 알려져 있지 않다. 헤테로 에피택시는 성장되는 기판과 에피층 사이의 격자상수 차이와 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 응력을 완화시키기 위해 결함이 생성되어 품질이 저하된다. 그럼에도 불구하고 우수한 특성을 가진 알파상을 성장하기 위해 다양한 방법으로 연구가 진행 중에 있다.

알파상의 헤테로 에피택시 성장 방법으로는 미스트(mist)-chemical vapor deposition(Mist-CVD)[11], molecular beam epitaxy(MBE)[4], halide vapor phase epitaxy (HVPE)[12]가 있다. 미스트-CVD는 알파상에서 가장 많은 연구 결과를 보고한 장비로써 초음파에 의해 전구체가 포함된 수용액이 미스트 상태로 캐리어 기체와 함께 반응로로 주입되어 기판 위에서 산소와 반응하여 알파 갈륨 산화물로 합성된다. 전구체 수용액을 개발하면 다양한 원소로 도핑까지 할 수 있어 일본에서 많이 사용되는 장비이다. MBE는 고가의 진공 장비로 고품질의 갈륨 산화물을 성장할 수 있고 도핑이 용이하여 갈륨 산화물 소재 기반의 소자는 MBE 장비로 성장된 소자가 다수 보고되었다. 그러나 성장률이 시간당 수 백 나노로 성장된다는 단점이 있다. 마지막으로 HVPE 장비는 성장률이 다른 장비와 비교하여 수 배에서 수 십 배 이상 빠르기 때문에 향후 양산형 시스템에 적합한 장비로 여겨진다. 고순도의 전구체를 사용하기 때문에 성장된 박막의 불순물 농도가 매우 낮은 장점이 있다.

기존 보고된 질화물계 반도체 에피 성장 분야에서는 고품질의 에피층을 얻기 위해서 여러 가지 방법을 시도하였다. 그중에 하나는 patterned sapphire substrate(PSS) 위에 에피층을 성장하는 방법이다[13]. PSS는 에피층의 수평 성장을 유도하고 기판과 에피층 계면에서 발생하는 관통 전위 밀도(threading dislocation density)를 패턴 쪽으로 진행 방향을 바꿔 표면으로 향하지 못하게 하여 에피층의 품질을 향상시키는 결과를 보여준다.

본 연구에서는 HVPE 장비를 이용하여 PSS 위에 α -Ga₂O₃ 에피층을 성장하였고 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 특성을 연구하였다. 성장된 에피층의 특성을 비교하기 위해 일반 사파이어와 PSS를 사용하였고 패턴의 크기 변화에 따른 특성 변화를 확인하기 위해 서로 다른 크기의 PSS를 적용하였다. 또한 α -Ga₂O₃ 에피층의 성장 온도를 변화시켜 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 최적 성장 온도에 대한 연구를 진행하였다.

3. 실험 방법

본 연구의 α -Ga₂O₃ 에피층은 수평형 HVPE 방법으로 성장되었다. HVPE 장비는 소스 영역과 성장 영역으로 구분되어 있고 성장 온도는 저항 가열 방식으로 조절된다. 소스 영역에는 갈륨 금속이 놓여져있고 HCl 기체와 반응하여 GaCl₃가 생성된다. 성장 영역에는 기판이 위치해 있어 소스 영역에서 생성된 GaCl₃와 산소가 반응하여 Ga₂O₃ 에피층을 형성한다. 각 반응 가스를 소스 영역에서 성장 영역으로 이동시키기 위한 캐리어(carrier) 기체는 고순도 질소를 사용하였다.

Table 1은 α -Ga₂O₃ 에피층의 성장 조건과 성장된 에피층의 표면 거칠기 값을 나타내고 있다. Sample 1-3은 일반 c-plane 사파이어 기판과 PSS의 원뿔 형태 패턴 크기가 다른 두 종류 기판 위에 α -Ga₂O₃ 에피층을 성장하였고 Sample 4-6은 패턴의 크기가 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 성장 온도를 변화하여 α -Ga₂O₃ 에피층을 성장하였다. 성장 온도가 변화되는 경우

Table 1
Surface roughness of α -Ga₂O₃ epilayers with pattern size and growth temperature

	Substrate	Growth temperature (°C)	Roughness (nm)
Sample 1	NSS	470	7.26
Sample 2	1 × 1 PSS	470	7.03
Sample 3	2 × 1 PSS	470	86.9
Sample 4	1 × 1 PSS	500	15.28
Sample 5	1 × 1 PSS	520	114.35
Sample 6	1 × 1 PSS	550	202.1

에는 성장 속도가 변하기 때문에 각각의 성장 온도에서 성장률을 고려하여 동일한 두께로 성장하여 그 특성 분석을 진행하였다.

성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 표면 형상을 확인하기 위해 광학현미경(Optical Microscope, Olympus, BX51), 원자현미경(Atomic Force Microscope, Em4sys, Nano xpert II) 과 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscope, Jeol, JSM-6700F)을 통해 측정하였다. 또한 X선 회절 분석법(X-Ray Diffraction, Rigaku, D/max2500)을 이용해 α -Ga₂O₃ 에피층의 결정성을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 1은 일반 c-plane 사파이어 기판과 패턴의 크기가 다른 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 표면과 단면을 측정한 전계방출형 주사전자현미경 이미지이다. 일반 사파이어 기판에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층은 표면이 평평하였고 크랙은 관찰되지 않았다. 단면 측정을 통한 두께는 약 3 μ m 정도로 확인되었고 매우 균일하게 성장되었다. 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층에서도 표면에 크랙이 관찰되지 않았으며 단면도 균일하게 성장되었다.

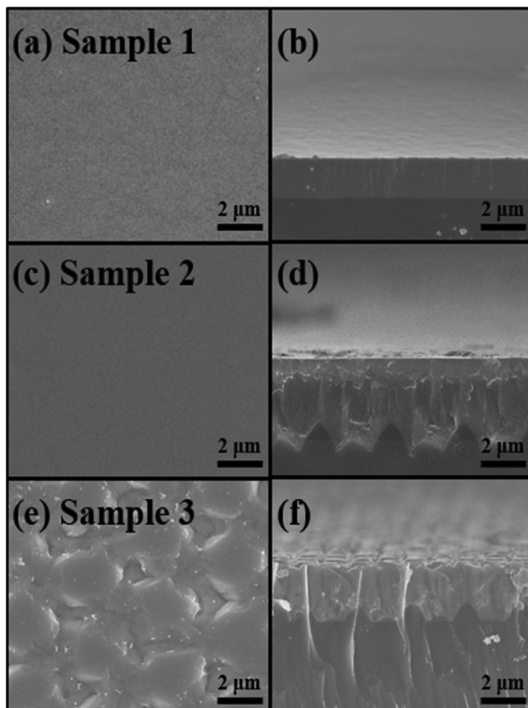


Fig. 1. FE-SEM images of surface and cross-sections of α -Ga₂O₃ epilayer grown on (a, b) planar sapphire and (c, d) α -Ga₂O₃ epilayers grown on 1 \times 1 PSS and (e, f) 2 \times 1 PSS at 470°C.

패턴 크기가 직경이 2 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층은 3 μ m의 성장으로는 표면에서 평평하게 성장되지 않고 표면이 매우 거칠게 나타났다. 각 패턴이 형성된 PSS에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층 내에 패턴 사이의 기공은 관찰되지 않았으며 패턴과 성장층의 계면이 확실하게 구분되었다.

Fig. 2는 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 성장 시간 변화에 따른 α -Ga₂O₃ 에피층의 전계방출형 주사전자현미경 이미지이다. Fig. 2(a, b)는 성장 전에 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS의 표면과 단면 이미지를 보여준다. Fig. 2(c, d)는 PSS 위에 10분 동안 성장한 α -Ga₂O₃ 에피층의 표면과 단면 이미지이다. 원뿔 형태의 패턴 전면에서 여러 결정면을 따라 성장되는 모습이 나타났고 패턴과 패턴 사이의 노출된 c-plane 사파이어 기판의 바닥면에서 채워지며 c 축 성장되는 것을 확인하였다. Fig. 2(e, f)는 20분 동안 성장한 α -Ga₂O₃ 에피층의 표면과 단면의 모습이다. 원뿔 형태의 패턴 전면에서 성장된 부분은 패턴

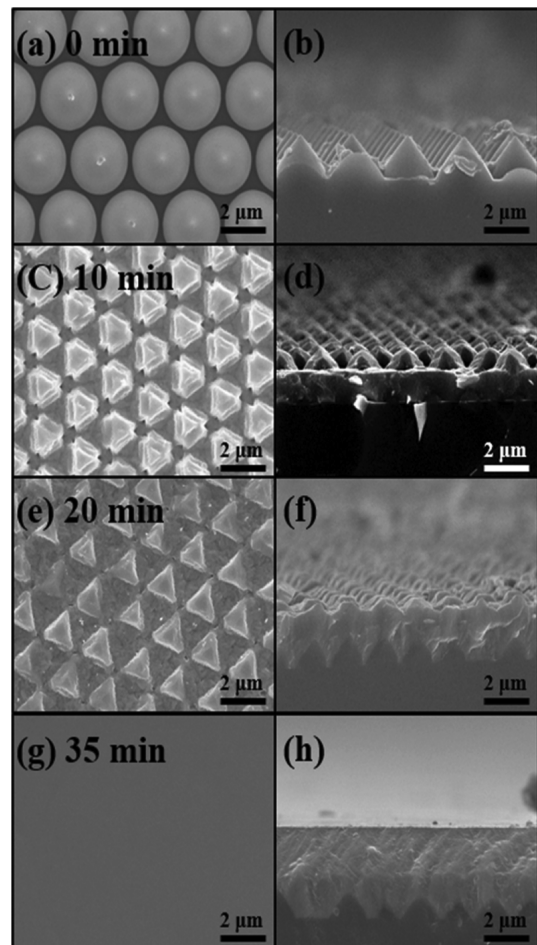


Fig. 2. FE-SEM images of surface and cross-sections for (a, b) 1 \times 1 PSS, (c, d) α -Ga₂O₃ grown on 1 \times 1 PSS at 470°C for 10 min, (e, f) 20 min, and (g, h) 35 min.

사이에서 c -축 방향으로 빠른 속도로 성장된 α - Ga_2O_3 에피층에 의해 성장이 제한되며 대부분의 영역이 결합(merge)되었다. 결과적으로 일정한 패턴 형태를 보이며 가장 윗부분의 성장한 것만 남아 삼각형 모양이 관찰되었다. Fig. 2(g, h)는 35분 동안 성장한 α - Ga_2O_3 에피층의 표면과 단면의 이미지이다. 성장 시간이 약 35분 정도 진행되었을 때 모든 원뿔 형태의 패턴이 성장된 α - Ga_2O_3 에피층에 의해서 표면에서 관찰되지 않고 평평한 표면하고 균일한 표면이 관찰되었다. 단면 측정을 통해 성장된 두께는 패턴 끝부터 약 $3\ \mu\text{m}$ 정도가 성장되었음을 확인하였다. 이 결과를 통해서 원뿔 형태의 패턴의 전면에서도 각각의 다른 결정면의 Ga_2O_3 가 성장되지만 성장 속도가 제한적이며 패턴의 바닥에서 성장된 c -축 방향의 빠른 성장 속도에 의해서 일정 두께 이상에서는 평평한 표면 형상을 나타내는 것으로 판단된다.

앞선 결과를 통해서 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 $1\ \mu\text{m}$ 이고 높이가 $1\ \mu\text{m}$ 인 PSS 위에 α - Ga_2O_3 에피층은 균일하게 성장이 가능하다는 것을 확인하였다. 본 연구

그룹은 이미 보고된 논문에서 α - Ga_2O_3 에피층의 최적 성장 온도는 470°C 이며 400°C 와 700°C 에서는 상전이가 발생하며 엡실론상과 베타상이 각각 발생한다고 보고하였다[14]. 성장 온도는 성장된 에피층에 큰 영향을 미치는 변수로써 PSS 위에 성장된 α - Ga_2O_3 에피층의 경우 성장온도에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 성장 온도를 변화시켜가며 실험을 진행하였다. Fig. 3은 원뿔 형태의 패턴 크기의 직경이 $1\ \mu\text{m}$ 이고 높이가 $1\ \mu\text{m}$ 인 PSS 위에 $470\sim 550^\circ\text{C}$ 성장 온도에서 성장한 α - Ga_2O_3 에피 웨이퍼의 이미지와 광학현미경으로 표면 측정한 이미지이다. 성장 온도 470°C 와 500°C 에서 α - Ga_2O_3 에피층의 표면은 크랙 없이 평평하고 고르게 성장되었다. 그러나 성장 온도 520°C 이상에서 표면이 매우 거칠게 관찰되었다. 이는 α - Ga_2O_3 에피층의 상전이와 원자의 이동(atomic migration)으로 인해 발생된 것으로 판단된다[15]. PSS 위에 성장된 α - Ga_2O_3 에피층은 일반 c -plane 사파이어 기판에서의 성장보다 알파상이 성장되는 온도 범위가 더욱 작은 것을 확인하였다.

Fig. 4는 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 $1\ \mu\text{m}$ 이고 높이가 $1\ \mu\text{m}$ 인 PSS 위에 성장한 α - Ga_2O_3 에피층의 성장 온도 변화에 따른 상변화를 X선 회절 분석법 측정을 통해 관찰한 결과이다. XRD 측정 결과에서 주요하게 관찰된 피크는 $(0006)\ \alpha$ - Ga_2O_3 피크와 $(0006)\ \alpha$ - Al_2O_3 피크였다. $(0006)\ \alpha$ - Ga_2O_3 피크는 40.24° 에 위치한다[8]. 성장 온도 구간인 $470\sim 500^\circ\text{C}$ 내에서는 $(0006)\ \alpha$ - Ga_2O_3 피크는 40.24° 에서 크게 벗어나지 않았으며 동일한 위치에서 발생되었다. 이는 500°C 이하에서 성장된 α - Ga_2O_3 에피층은 잔류응력이 거의 없이 성장된 것을 의미한다. 헤테로 에피택시의 경우에는 성장되는 기판과 에피층 사이의 격자 상수 차이와 열팽창계수의 차이로 인해 잔류응력이 발생하여 에피층의 피크를 이동시킨다. 하지만 사파

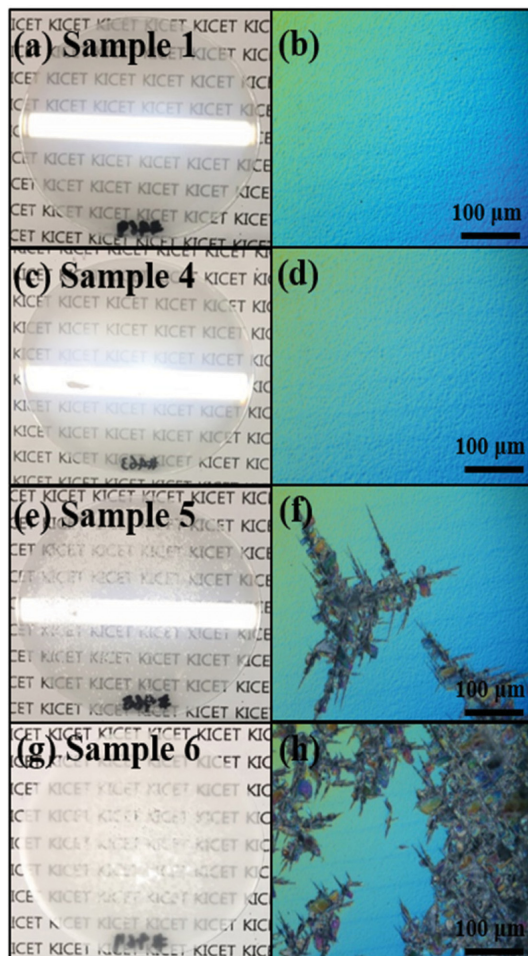


Fig. 3. Photo and OM images of α - Ga_2O_3 epilayers grown on 1×1 PSS at 470°C (a, b), 500°C (c, d), 520°C (e, f) and 550°C (g, h).

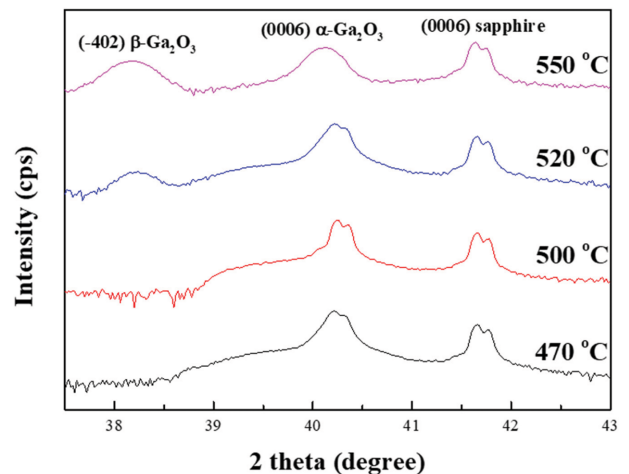


Fig. 4. $\theta/2\theta$ XRD spectra of the α - Ga_2O_3 epilayers grown on 1×1 PSS at different temperature.

Table 2
FWHM values of α -Ga₂O₃ epilayers grown on conventional sapphire and PSS

	(0006) FWHM (arcsec)	(10-14) FWHM
Sample 1	75	1539
Sample 2	984	1112
Sample 4	772	1035
Sample 5	1155	1180

이러 기판과 α -Ga₂O₃ 에피층의 구조는 동일한 corundum 구조이고 격자상수 차이가 c 축은 3.3 %, a 축은 4.5 % 이내로 비교적 낮은 차이를 보인다. 그러므로 피크의 위치는 거의 변화가 없었고 이는 잔류응력이 거의 없는 상태를 나타낸다. 그러나 성장 온도 520°C 이상에서는 (0006) α -Ga₂O₃ 피크의 강도가 약하게 나타나고 피크 위치도 40.24°에서 낮은 회절각도로 이동하였다. 또한 베타상 피크도 관찰되었고 이는 이전 연구결과[14]에서 보고된 상전이가 발생할 때와 동일한 현상과 일치한다.

여러 성장 온도에서 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 결정성을 확인하기 위해 고해상도 X선 회절 분석법 측정을 통해 반치폭을 측정하였다. Table 2는 α -Ga₂O₃ 에피층의 (0006)과 (10-14) 반치폭을 나타내고 있다. 성장된 에피층의 비교를 위해 일반 c-plane 사파이어 기판에도 약 3 μ m 정도의 α -Ga₂O₃ 에피를 성장하여 비교하였다. 일반 c-plane 사파이어 기판 위에 성장한 α -Ga₂O₃ 에피층의 (0006)과 (10-14) 반치폭은 각각 75, 1539 arcsec이다. 앞서 보고된 논문에서의 결과에서는 두께가 1 μ m 일 경우에 (0006)과 (10-14) 반치폭은 27, 2011 arcsec였다[14]. 성장되는 α -Ga₂O₃ 에피층의 두께가 증가하면 (0006) 반치폭은 소폭 상승하였고 (10-14) 반치폭은 크게 감소하였다. 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 1 μ m 이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 470°C의 성장 온도에서 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 (0006)과 (10-14) 반치폭은 984, 1112 arcsec로 각각 측정되었다. 성장온도가 500°C로 증가하게 되면 (0006)과 (10-14) 반치폭이 772, 1035 arcsec로 각각 감소되며 결정성이 향상되었다. 그러나 성장 온도가 520°C 이상부터 결정성의 저하가 나타난다. 이는 Fig. 4에서 관찰된 상전이에 의한 결과로 판단된다. (0006) 반치폭은 나선형 관통 전위 밀도와 관련이 있고 (10-14) 반치폭은 나선형과 칼날형 관통 전위 밀도와 연관되어 있다. 나선형과 칼날형 관통 전위는 각각 결합된 입자의 기울임(tilt)와 뒤틀림(twist)에 의해 발생된다. 일반 c-plane 사파이어 기판과 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층을 비교해 보면 (0006) 반치폭의 경우에 그 값이 크게 증가하였으나 (10-14) 반치폭은 감소하는 경향을 보였다. 이는 PSS의 주기적인 패턴은 입자가 결합할 때 입자의 뒤틀림을 억제하기 때문에 (10-14) 반치폭은 감

소되지만 입자의 기울임은 일반 c-plane 사파이어 기판에서 더욱 억제되기 때문에 상대적으로 PSS기판에서 성장시에 (0006) 반치폭은 증가된 것으로 판단된다 [16]. 또한 성장 온도가 30°C 정도 증가한 500°C의 경우는 470°C에서 PSS 위에 성장한 α -Ga₂O₃ 에피층과 비교했을 때 (0006), (10-14) 반치폭에서 모두 향상된 결과를 나타내고 있다. 이는 성장 온도 상승에 따른 패턴과 패턴 사이의 바닥면에서 c-축 성장되는 α -Ga₂O₃의 수평 성장이 활발해져 원뿔 형태의 패턴에서 성장이 억제되어 나타나는 결과로 판단된다. 원뿔 형태의 PSS를 이용한 α -Ga₂O₃ 에피 성장을 통해 결정성을 향상시킬 수 있는 방법 중에 하나이며 c-축 성장되는 α -Ga₂O₃의 수평 성장을 통해 원뿔 형태의 패턴에서 성장되는 에피층 억제가 가장 중요하다고 판단된다. 또한 PSS의 패턴의 형태와 크기는 다양하게 형성이 가능하기 때문에 성장 조건을 통한 제어와 동시에 패턴 형상 제어를 통한 결정성 향상에 대한 연구도 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 HVPE 성장법을 이용하여 원뿔 형태의 PSS 위에 매우 평평한 α -Ga₂O₃ 에피층을 성장하였다. α -Ga₂O₃ 에피층은 패턴의 크기와 성장 온도를 변화시키며 성장하였고 그 특성을 분석하였다. 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 성장된 α -Ga₂O₃ 에피층의 표면은 균일하고 빠른 성장 속도에도 매끄러운 표면 상태를 나타냈다. 또한, 470~500°C 성장 온도에서 성장된 에피층은 XRD 측정 결과에 의해 알파상으로 확인되었고 잔류응력이 거의 없는 상태로 성장되었다. 본 연구를 통해서 원뿔 형태의 패턴 크기가 직경이 1 μ m이고 높이가 1 μ m인 PSS 위에 500°C에서 성장한 α -Ga₂O₃ 에피층의 결정성은 (0006) 반치폭 772 arcsec, (10-14) 반치폭 1035 arcsec을 나타내었으며 이는 α -Ga₂O₃의 수평 성장에 의해 결정성이 향상되었다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2018R1D1A1B07048429) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Higashiwaki, H. Murakami, Y. Kumagai and A.

- Kuramata, "Current status of Ga₂O₃ power devices", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 (2016) 1202A1.
- [2] Z. Hu, K. Nomoto, W. Li, N. Tanen, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Nakamura, D. Jena and H.G. Xing, "Enhancement-mode Ga₂O₃ vertical transistor with breakdown voltage > 1 kV", *IEEE Electron Device Lett.* 39 (2018) 869.
- [3] S.J. Pearton, F. Ren, M. Tadjer and J.H. Kim, "Perspective: Ga₂O₃ for ultra-high power rectifiers and MOSFETS", *J. Appl. Phys.* 124 (2018) 220901.
- [4] D.Y. Guo, X.L. Zhao, Y.S. Zhi, W. Cui, Y.Q. Huang, Y.H. An, P.G. Li, Z.P. Wu and W.H. Tang, "Epitaxial growth and solar-blind photoelectric properties of corundum-structured α -Ga₂O₃ thin films", *Mater. Lett.* 164 (2016) 364.
- [5] D.Y. Guo, Z.P. Wu, P.G. Li, Y.H. An, H. Liu, X.C. Guo, H. Yan, G.F. Wang, C.L. Sun, L.H. Li and W.H. Tang, "Fabrication of β -Ga₂O₃ thin films and solar-blind photodetector by laser MBE technology", *Opt. Mater. Express* 4 1067 (2014) 1067.
- [6] C. Jin, S. Park, H. Kim and C. Lee, "Ultrasensitive multiple networked Ga₂O₃-core/ZnO-shell nanorod gas sensors", *Sens. Actuators B.* 161 (2012) 223.
- [7] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E.G. Villora, K. Shimamura and S. Yamakoshi, "Device-quality β -Ga₂O₃ epitaxial films fabricated by ozone molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Express* 5 (2012) 035502.
- [8] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M.H. Wong, D. Krishnamurthym A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Depletion-mode Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on β -Ga₂O₃ (010) substrates and temperature dependence of their device characteristics", *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 123511.
- [9] K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito and S. Fujita, "Evaluation of misfit in α -Ga₂O₃ epitaxial growth on α -Al₂O₃ substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (2012) 020201.
- [10] K. Kaneko, I. Takeya, S. Komori and S. Fujita, "Band gap and function engineering for novel functional alloy semiconductors: Bloomed as magnetic properties at room temperature with α -(GaFe)₂O₃", *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 233901.
- [11] K. Akaiwa, K. Kaneko, K. Ichino and S. Fujita, "Conductivity control of Sn-doped α -Ga₂O₃ thin films grown on sapphire substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 (2016) 1202BA.
- [12] Y. Oshima, E.G. Villora and K. Shimamura, "Halide vapor phase epitaxy of twin-free α -Ga₂O₃ on sapphire (0001) substrate", *Appl. Phys. Express* 8 (2015) 055501.
- [13] D.H. Kang, E.S. Jang, H. Song, D.W. Kim, J.S. Kim, I.H. Lee, S. Kannappan and C.R. Lee, "Growth and evaluation of GaN grown on patterned sapphire substrate", *J. Korean Phys. Soc.* 52 (2008) 1895.
- [14] H.K. Son and D.W. Jeon, "Optimization of the growth temperature of α -Ga₂O₃ epilayers grown by halide vapor phase epitaxy", *J. Alloys Compd.* 773 (2019) 631.
- [15] H.K. Son, Y.J. Choi, J.H. Hwang and D.W. Jeon, "Influence of post-annealing on properties of α -Ga₂O₃ epilayer grown by halide vapor phase epitaxy", *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 7 (2019) Q1.
- [16] Y. Chen, Z. Chen, J. Li, Y. Chen, C. Li, J. Zhan, T. Yu, X. Kang, F. Jiao, S. Li, G. Zhang and B. Shen, "A study of GaN nucleation and coalescence in the initial growth stage on nanoscale patterned sapphire substrate via MOCVD", *Cryst. Eng. Comm.* 20 (2018) 6811.