

## Characterization of epitaxial layers on beta-gallium oxide single crystals grown by EFG method as a function of different crystal faces and off-angle

Min-Ji Chae, Sun-Yeong Seo, Hui-Yeon Jang, So-Min Shin, Dae-Uk Kim, Yun-Jin Kim, Mi-Seon Park, Gwang-Hee Jung, Jin-Ki Kang\*, Hae-Yong Lee\*\* and Won-Jae Lee†

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

\*AXEL, Jinju 52818, Korea

\*\*LumiGNtech Co, Ltd, Gwangmyeong-si, 14322, Korea

(Received July 11, 2024)

(Revised July 18, 2024)

(Accepted July 26, 2024)

**Abstract**  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  is a representative ultra-wide bandgap (UWBG) semiconductor that has attracted much attention for power device applications due to its wide-bandgap of 4.9 eV and high-breakdown voltage of 8 MV/cm. In addition, because solution growth is possible, it has advantages such as fast growth rate and lower production cost compared to SiC and GaN [1-2]. In this study, we have successfully grown Si-doped 10 mm thick Si-doped  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals by the EFG (Edge-defined Film-fed Growth) method. The growth direction and growth principal plane were set to [010] / (010), respectively, and the growth speed was 7~20 mm/h. The as-grown  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystal was cut into various crystal planes (001, 100,  $\bar{2}01$ ) and off-angles (1°, 3°, 4°), and then surface processed. After processed, the homoepitaxial layer was grown on the epi-ready substrate using the HVPE (Halide vapor phase epitaxy) method. The processed samples and the epi-layer grown samples were analyzed by XRD, AFM, OM, and Etching to compare the surface properties according to the crystal plane and off-angle.

**Key words**  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , Edge-defined film-fed growth, Off-angle, Properties analysis, Halide vapor phase epitaxy (HVPE), Homoepitaxial layer

## EFG 법으로 성장시킨 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정의 다양한 결정면, off-angle에 따른 epitaxial layer의 특성 분석

채민지, 서선영, 장희연, 신소민, 김대욱, 김윤진, 박미선, 정광희, 강진기\*, 이해용\*\*, 이원재†

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

\*AXEL, 진주, 47340

\*\*루미지엔테크, 광명, 14322

(2024년 7월 11일 접수)

(2024년 7월 18일 심사완료)

(2024년 7월 26일 게재확정)

**요약**  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 4.9 eV의 넓은 밴드갭과 8 MV/cm의 높은 항복전압으로 전력 소자 응용 분야에서 많은 관심을 받고 있는 대표적인 UWBG(Ultra-wide Band-gap) 반도체이다. 또한 용액 성장이 가능하기 때문에 SiC, GaN에 비해 성장 속도가 빠르고 생산 비용이 저렴하다는 장점이 있다[1,2]. 본 연구에서는 EFG(Edge-defined Film-fed Growth) 법을 통해 Si 도핑된  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  단결정을 성장시키는 데에 성공하였다. 성장 방향과 성장 주 면은 각각 [010] / (001)로 설정하였으며 성장 속도는 7~20 mm/h이다. 성장시킨  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  단결정은 다양한 결정면 방향(001, 100,  $\bar{2}01$ )과 off-angle(1°, 3°, 4°)에 따라 절단하여 표면 가공을 진행하였고, 가공 후 HVPE(Halide vapor phase epitaxy) 법을 이용해 epi-ready 기판 위에 homoepitaxial 층을 성장시켰다. 가공 후의 샘플과 epi-layer를 성장시킨 샘플을 XRD, AFM, OM, Etching 등의 분석을 통해 결정면과 off-angle에 따른 표면 특성을 비교하였다.

†Corresponding author  
E-mail: leewj@deu.ac.kr

### 1. 서 론

$Ga_2O_3$  (Gallium oxide)는 넓은 밴드갭(~4.8 eV)과 뛰어난 열적 안정성으로 인해 차세대 전력 소자와 자외선 검출기 등에서 주목받고 있는 소재이다[3].  $\beta-Ga_2O_3$ 는 높은 전자 이동도와 큰 항복 전압(8 MV/cm)을 가져 고효율, 고전력 소자에 적합하다[4]. 산화 갈륨은  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 의 5가지 결정 다형이 보고되었으며, 5가지 상 중  $\beta$  상이 열적으로 가장 안정한 상이다[5,6]. 따라서 Bulk 단결정 성장에 가장 안정한  $\beta$  상이 주로 성장된다. 산화 갈륨의 대표적인 액상 성장법에는 EFG, CZ, FZ, VB 등이 있으며, 그 중 EFG 법은 성장 속도가 빨라 대량 생산과 대구경 결정 성장에 유리하다[7]. 산화 갈륨 단결정을 전력 반도체용 소자에 적용하기 위해서는 기관의 성능 향상을 위한 epitaxial layer 성장이 필수적이다. 현재 산화 갈륨 epitaxial layer 성장 방법으로는 MBE[8-10], MOVPE(Metalorganic vapor phase epitaxy)[11, 12], PLD(Pulsed laser deposition)[13], mist-CVD(mist chemical vapor deposition)[14], HVPE(Halide vapor phase epitaxy)[15-17] 등의 기술이 보고되었다. 산화 갈륨은 monoclinic 결정 구조로 인해 면 방향에 따른 이방성이 커 결정 면에 따라 다른 특성을 가지기 때문에 epitaxial layer 성장에 적합한 결정면과 off-angle을 조사할 필요가 있다.

본 연구에서는 EFG(Edge-defined Film-fed Growth) 법으로 Si 도핑된  $\beta-Ga_2O_3$  단결정을 성장시키고, 다양한 면 방향과 off-angle을 가진 기관을 제작하여 epitaxial

layer의 결정 품질, 표면 거칠기 및 표면 형상, 결합 밀도 등의 특성을 평가하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 다중 슬릿 구조의 Die를 이용한 EFG 법을 통해 Si 도핑된 10 mm 두께의  $\beta-Ga_2O_3$  단결정 성장에 성공하였다. 다중 슬릿 구조는 모세관 현상에 의해 melt가 상승하는 부분, 즉 슬릿 구조를 하나의 Die에 2개 이상 도입하여 넓은 두께의 다이에서 두께방향 성장을 용이하게 하는 장점이 있다. 이로 인해 상용화를 위한 결정 생산 시 성장 효율을 증대시킬 수 있다. Figure 1에 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법의 개략도를 나타냈다. 성장된 단결정의 성장 방향과 성장 주 면은  $[010] / (001)$ 이다. 성장된  $\beta-Ga_2O_3$  단결정은  $N_2$  분위기에서

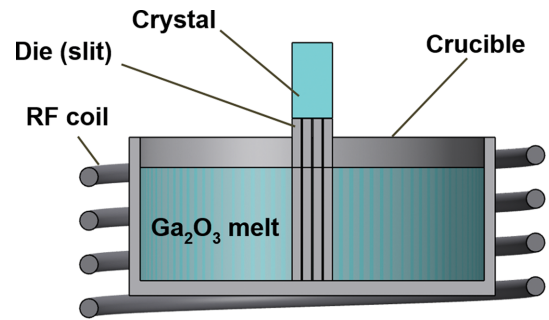


Fig. 1. Schematic of EFG method.

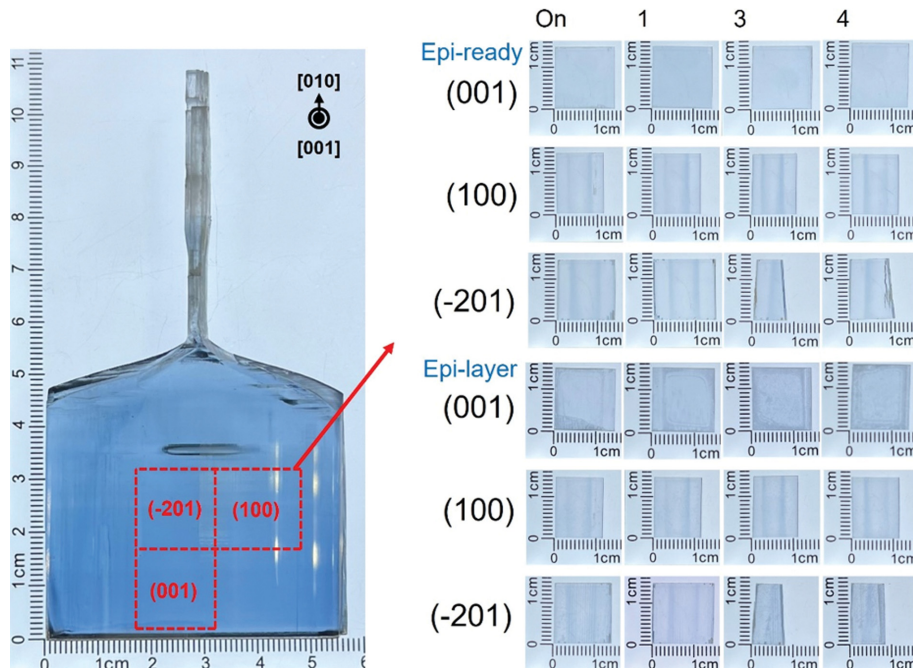


Fig. 2. As-grown  $\beta-Ga_2O_3$  ingot and epi-ready/epi-layer samples cut from  $\beta-Ga_2O_3$  single crystal.

1,390°C로 10시간 동안 열처리를 진행한 후, Single Wire Saw 장비를 이용하여 다양한 결정면과 off-angle 에 따라 절단하였다. 절단한 샘플은 DMP / CMP 과정을 거쳐 양면 표면 연마를 진행하였다. 다양한 결정 면과 off-angle에 따른 샘플 크기는 약 15 mm × 15 mm ×

0.6 mm이며, 성장 잉곳과 각 샘플 이미지는 Fig. 2에 나타냈다. 가공 후 HVPE 법을 사용하여  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> homoepitaxial 층을 다양한 면 방향의 off-angle 기판 위에 성장시켰다. LumiGNtech 사의 HVPE system을 사용하였으며, HVPE의 개략도와 성장 조건은 Fig. 3에

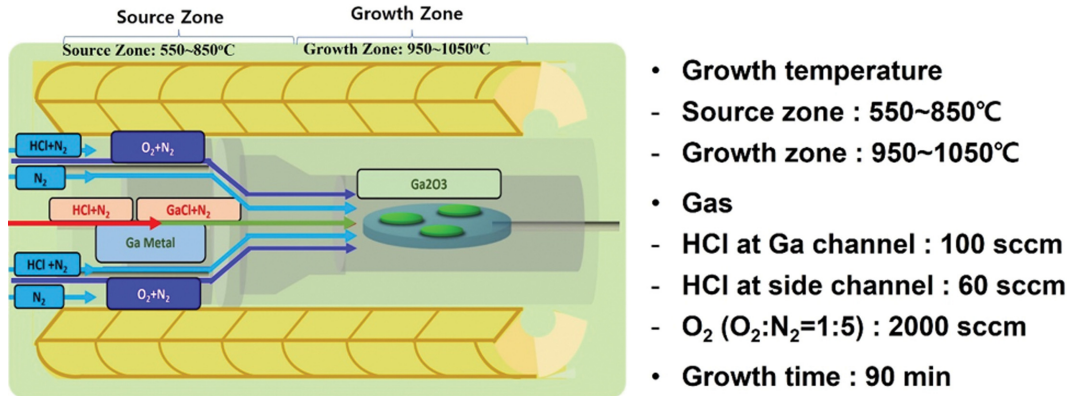


Fig. 3. Schematic drawing of HVPE system and growth conditions for the growth of Gallium oxide.

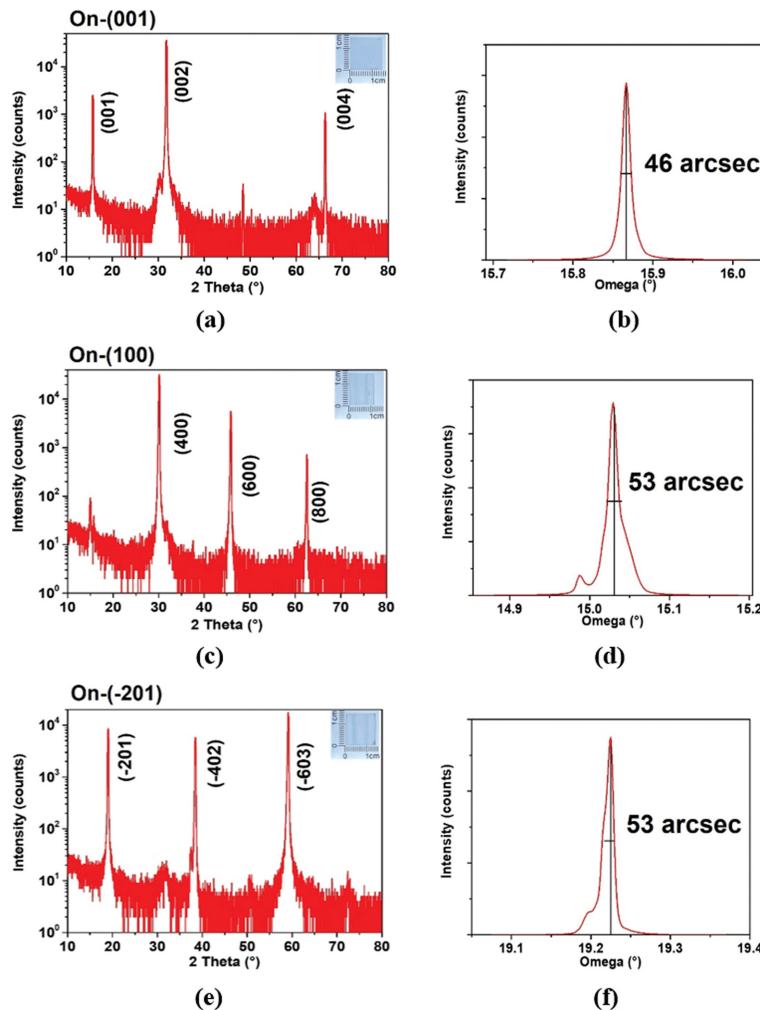


Fig. 4. Results of Theta-2theta scan and Rocking curve analysis of various epi-ready crystal planes; Theta-2theta scan results (a) (001), (c) (100), (e) (201), Rocking curve results (b) (001), (d) (100), (f) (201).

나타냈다. 각 샘플과 epi-layer의 결정 면 방향과 결정 품질을 확인하기 위해 MP-XRD 장비를 이용한 Theta-2theta scan, HR-XRD 장비를 이용한 Rocking Curve 분석을 진행하였다. AFM 장비를 이용해 각 샘플의 표면 거칠기(Ra) 및 OM(Optical microscope)을 이용한 epi-layer의 표면 이미지 분석을 진행하였으며, 결함 형태 및 결함 밀도 분석을 위해 인산 용액을 이용해 wet-etching을 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

앞서 언급한 바와 같이 사용된 샘플은 모두 Fig. 2에 나타난  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단결정에서 다양한 면 방향에 따라 절단하여 추출했으며, off-angle에 따라서 0°는 (001), 1°는 1(001), 3°는 3(001), 4°는 4(001)과 같이 표기하였다. (100), ( $\bar{2}$ 01) 면 또한 동일한 방식으로 표기하였다. Epi-layer 증착 후 샘플은 각 샘플 이름에 epi-를 붙여 구분하였다.

Epi-ready 샘플과 as-grown epi-layer의 결정 면 방향 확인을 위해 Multi-Purpose X-ray Diffractometer(MP-XRD)(Cu-K $\alpha$  radiation with  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , X'Pert-PRO MPD, PANalytical, Holland) 장비를 이용하였으며, Theta-2theta scan mode로 10°~80° 구간에서 측정하였다. 각 샘플과 epi-layer의 결정 품질 비교를 위해 High-Resolution X-ray Diffractometer(HR-XRD)(Cu-K $\alpha$  radiation with  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , X'Pert-PRO MRD, PANalytical, Holland) 장비를 이용하여 Rocking Curve 분석을 진행하였고, 각각의 FWHM(반치폭) 값을 확인하였다. 분석 결과, Fig. 4에 나타난 것과 같이 (001) 샘플은 (001), (002), (004) 면의 회절각에 해당하는 15.82°, 31.81°, 66.29°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 46 arcsec였다. (100) 샘플은 (400), (600), (800) 면의 회절각에 해당하는 30.11°, 45.83°, 62.53°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 53 arcsec, ( $\bar{2}$ 01) 샘플은 ( $\bar{2}$ 01), ( $\bar{4}$ 02), ( $\bar{6}$ 03) 면의 회절각에 해당하는 19.05°, 38.45°, 59.16°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 53 arcsec였다. 다양한 면 방향에 따라 순수한 품질의 샘플이 얻어졌음을 확인

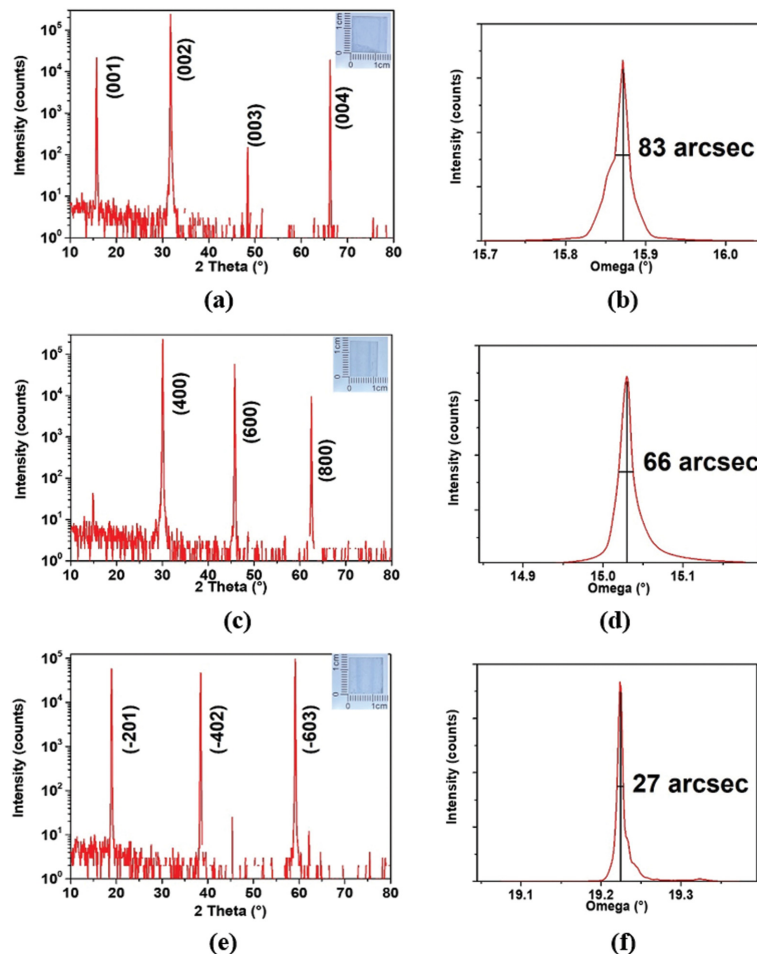


Fig. 5. Results of theta-2theta scan and Rocking curve analysis of various epi-layer crystal planes.; Theta-2theta scan results (a) epi-(001), (c) epi-(100), (e) epi-(201), Rocking curve results (b) epi-(001), (d) epi-(100), (f) epi-(201).

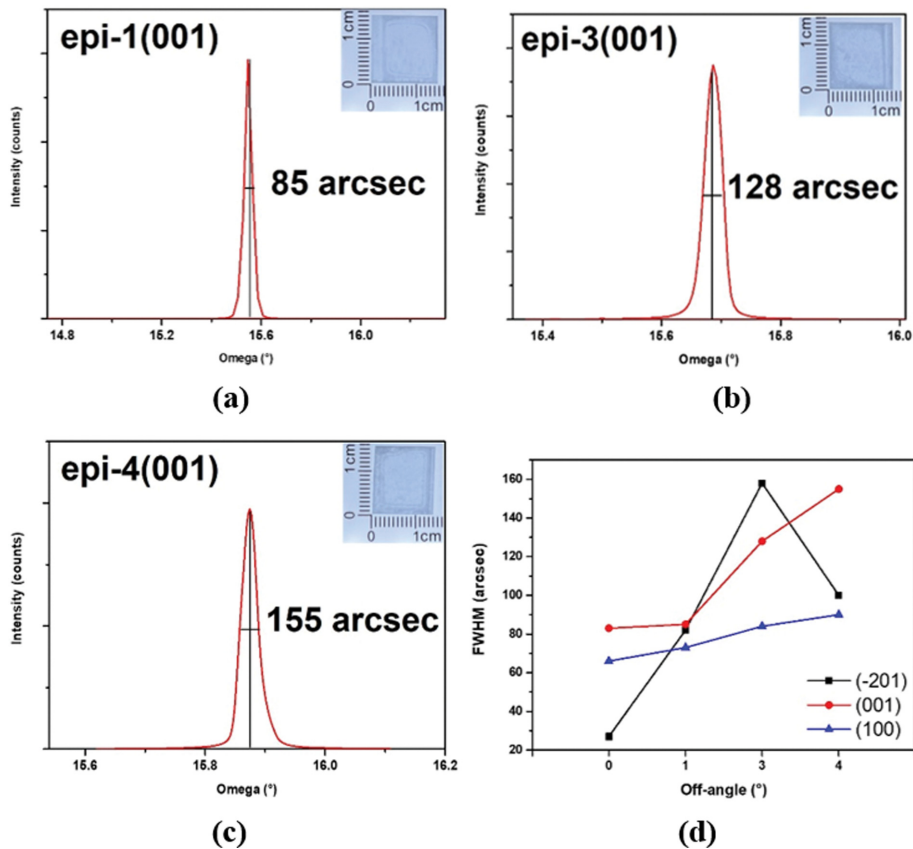


Fig. 6. Results of rocking curve analysis of various epi-layer crystal plane as a function of off-angle; (a) epi-1 (001), (b) epi-3 (001), (c) epi-4 (001), (d) Trend graph of Rocking curve analysis of epi-layer crystal plane in each orientation as a function of off-angle.

하였다. FWHM을 통한 결정 품질 분석 결과 (001) 면의 결정질이 46 arcsec로 가장 우수함을 확인하였다.

각 기관에 HVPE 방법을 통해 epi-layer를 성장시킨 후 as-grown epi-layer의 결정 면과 결정 품질을 분석하였다. Figure 5에 나타낸 것과 같이 epi-(001) 샘플은 (001), (002), (003), (004) 면에 해당하는 peak가 확인되었으며 FWHM은 83 arcsec, epi-(100) 샘플은 (400), (600), (800) 면에 해당하는 peak가 확인되었으며 FWHM은 66 arcsec였다. 마지막으로 epi-(201) 샘플은 (201), (402), (603) 면에 해당하는 peak가 확인되었으며 FWHM은 27 arcsec로 나타났다. 다양한 기관 면 방향에 따라 동일한 면 방향의 epi-layer가 성장되었음을 알 수 있으며 FWHM 분석을 통해 (201) 면에서 27 arcsec의 기관 품질 대비 우수한 품질의 epi-layer가 성장되었음을 알 수 있다.

각 면 방향 별로 off-angle에 따른 결정 품질 분석 또한 진행하였다. Figure 6(a), (b), (c)에 (001) 면에 대한 epi-layer의 FWHM 값을 대표적으로 나타냈다. Figure 6(d)에 나타낸 바와 같이 기관의 면 방향과 관계없이 대체로 off-angle이 증가함에 따라 FWHM 값이 증가하는 경향을 알 수 있다.

각 샘플의 표면 거칠기 및 이미지 분석을 위해서 Atomic Force Microscope(SPA-400, Seiko Instruments,

Japan) 장비를 사용하였다. 2D 이미지와 3D 이미지 모두  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  범위에서 측정을 진행하였으며 epi-ready 기관의 2D 이미지 결과를 Fig. 7에, epi-layer 성장 후 기관의 2D, 3D 이미지 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 분석 결과, epi-ready 기관의 면 방향에 따른 샘플의 표

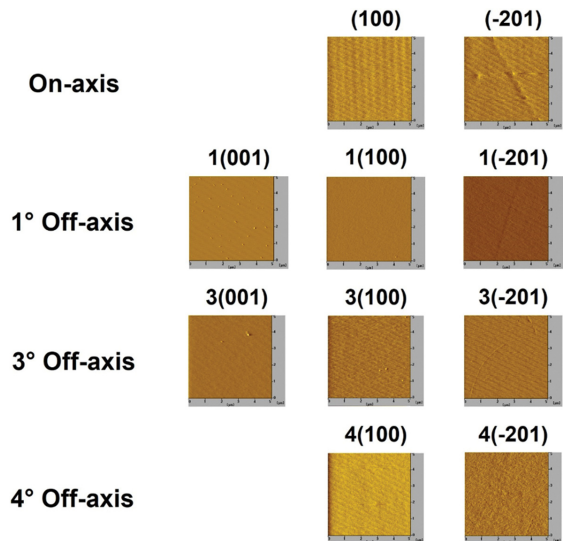


Fig. 7. Results of surface image of epi-ready substrates analysis of various crystal planes and off-angle using AFM.

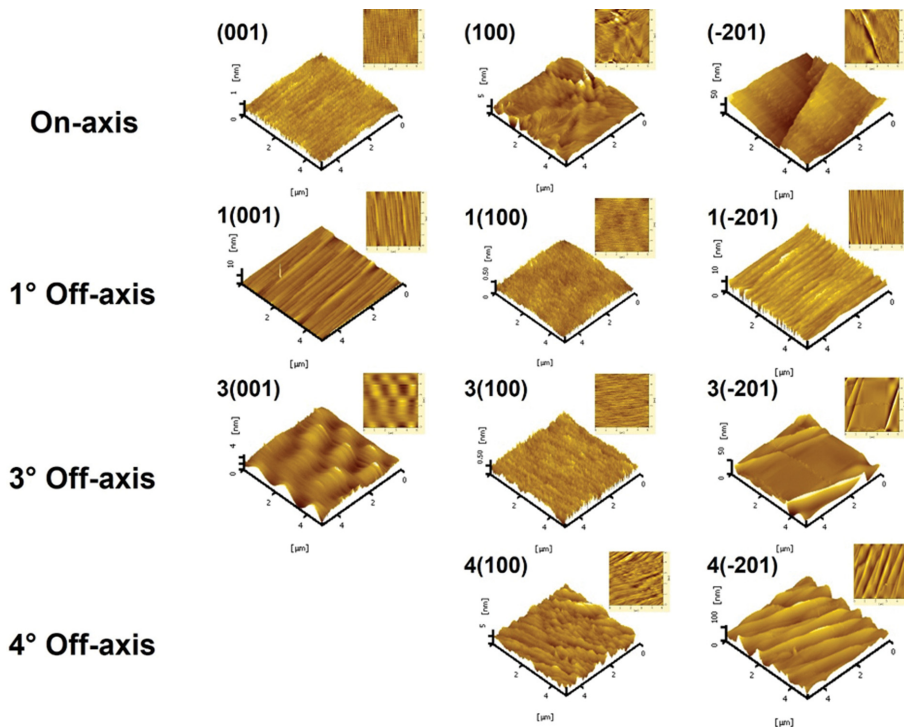


Fig. 8. Results of surface image of epi-layer analysis of various crystal planes and off-angle using AFM.

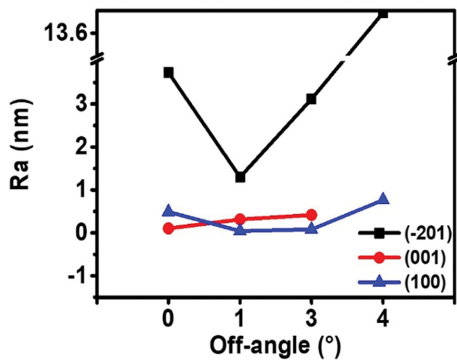


Fig. 9. Trend graph of surface roughness analysis of epi-layer crystal plane in each orientation as a function of off-angle.

면 거칠기 값은 뚜렷한 차이나 경향성이 거의 없음을 확인할 수 있다. Epi-layer 성장 직후의 기판의 표면 거칠기 값을 분석한 결과 면 방향에 따라 (100) 면과 (001) 면이 낮은 거칠기 값을 가지는 경향을 확인할 수 있었다. Off-angle에 따른 차이는 뚜렷하지 않지만 1°, 3° 각도에서 대체로 낮은 경향을 나타냈다. 이와 같은 경향성을 Fig. 9에 off-angle에 따른 Ra 값 그래프로 나타냈으며, 각 샘플의 Ra 값을 Table 1에 나타냈다. 대체적으로 Off-angle의 각도가 커짐에 따라 표면 거칠기 값이 증가하는 경향을 보였으며 On-axis 보다 4° 이하의 off-angle에서 표면 거칠기 값이 감소하는 경향을 보였다.

OM(Optical Microscope) 이미지를 통해 off-angle이 증가함에 따라 표면 형상의 변화 양상을 비교하였다. 각

Table 1 Results of surface roughness analysis of epi-layer crystal planes in each orientation and off-angle using AFM

Ra(nm)	(001)	(100)	( $\bar{2}01$ )
On-axis	1.033E-1	4.866E-1	3.736E+0
1° Off-angle	3.1167E-1	4.256E-2	1.298E+0
3° Off-angle	4.157E-1	7.989E-2	3.116E+0
4° Off-angle	-	7.632E-1	1.369E+1

면 방향과 off-angle에 따른 OM 이미지는 Fig. 10에 나타났다. (001) 면 방향에서는 off-angle과 무관하게 모두 [010] 방향에 평행한 stripe 무늬를 나타내며 epi-layer가 성장되었음을 알 수 있다. 이는 기존에 발표된 HVPE 방법을 통한 (001) 면에서의 epi-layer 성장 양상과 동일함을 확인할 수 있으며, 이러한 형태는  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 의 (100) 면에서의 성장률이 (001) 면의 성장률보다 낮아 기판의 misorientation으로 인해 형성될 수 있다고 알려져 있다 [15,18]. (100), ( $\bar{2}01$ ) 면의 샘플에서는 공통적으로 step 형태의 표면 형상이 관찰되었으며 off-angle이 증가함에 따라 step의 terrace 폭이 감소하는 양상을 보였다.

마지막으로, as-grown epi-layer 기판을  $\text{H}_3\text{PO}_4$  용액을 사용해 140°C에서 총 60~90분간 etching 진행한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 면 방향에 따른 epi-layer의 표면을 광학 현미경을 이용해 (001) 면은 200 배율, 나머지 면은 500 배율 렌즈로 관찰하였다. (001), ( $\bar{2}01$ ) 면의 샘플에서는 전위에서 기원된 Cannonball shape, Bullet shape의 결합, (100) 면의 샘플에서는 전위에서 기원된

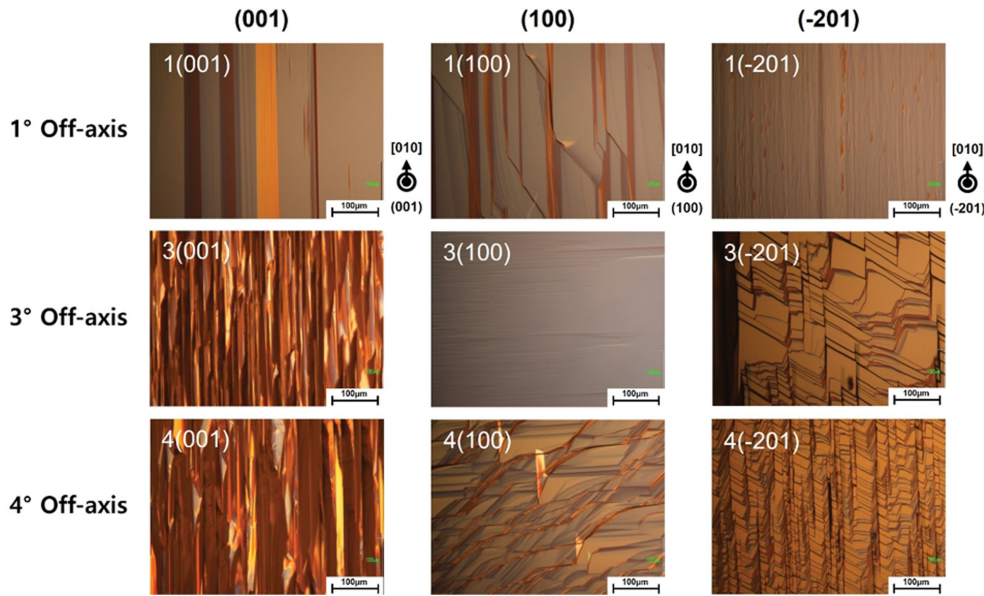


Fig. 10. Surface morphology of various crystal plane and off-angle using Optical microscope. Image observed at X200.

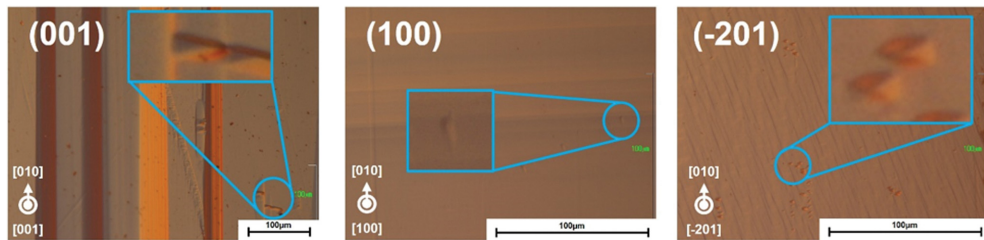


Fig. 11. Defect shape analysis results of various crystal planes using Etching; (001)\_X200, (100)\_X500, (201)\_X500.  
\* Blue box : Enlarged image of the etch pit.

Oval shape의 결함이 관찰되었다[19-22]. 면 방향에 따른 샘플의 EPD(Etch Pit Density)는 (001), (100), (201) 면에서 각각 약  $8.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ ,  $8.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ ,  $5.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 로 확인되었으며, (001) 면에서 가장 낮은 EPD 값을 보였다. 현재 전 세계적으로  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  상용화 웨이퍼를 가장 많이 공급하고 있는 Novel Crystal Technology 사 웨이퍼의 EPD 값과 비교하였을 때, 약 10~100배 가량 차이가 나는 것을 확인하였다[7]. Epi-layer의 etch pit은 기판의 전위로부터 전파되므로 이 같은 차이를 줄여 고품질의 기판을 얻기 위해서는 성장 공정 중 수직 온도구배, pulling rate 등의 공정 변수를 최적화하여 기판 상의 twin이나 stacking fault 등의 결함을 줄이는 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 기판 제조 공정의 최적화를 통해서 가공 과정에서 유발되는 결함도 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 EFG 법으로 성장한 Si 도핑 된 10

mm 두께의  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  단결정을 이용하여 다양한 면 방향과 off-angle에 따른 epi-ready 기판과 epi-layer의 표면 특성을 조사하였으며, 이를 통해 산화 갈륨 homoepitaxial 층 성장에 있어 최적화된 면 방향과 off-angle을 조사하고자 하였다.

(001) 면을 주 면으로 성장한  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  단결정을 면 방향에 따라 절단하여 MP-XRD, HR-XRD를 통해 결정 면 및 결정 품질 분석을 진행한 결과, 각 샘플은 (001), (100), (201) 면으로 절단됨을 확인하였고 epi-ready 기판에서는 (001) 면의 결정 품질이 46 arcsec, as-grown epi-layer에서는 (201) 면이 27 arcsec로 가장 우수하였고, off-angle에 따라서는 면 방향에 관계없이 off-angle이 증가함에 따라 결정 품질이 저하되는 양상을 확인하였다. AFM을 통한 표면 거칠기 분석에서는 epi-ready 기판에 대해서는 면 방향, off-angle에 따른 샘플의 경향성을 확인할 수 없었으나 as-grown epi-layer의 표면 거칠기 분석에서는  $4^\circ$  이하에서 거칠기 값의 감소 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

$\text{H}_3\text{PO}_4$  용액을 이용한 wet-etching을 통해 as-grown epi-layer의 결함 분석을 진행한 결과, 면 방향에 따라

기판에서 전파된 결함에 의해 epi-layer의 표면에 나타나는 Etch pit 형태에 차이가 있는 것을 확인하였으며 (001), (100), (201) 면 방향 순으로 EPD 값의 증가 양상을 확인하였다.

결론적으로 고품질의 epitaxial 층을 성장하기에 가장 적합한  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단결정 기판의 면 방향은 결함 밀도가 가장 적고 기판 품질이 우수한 (001) 면이라 결론지을 수 있으며, 3° 이하의 off-angle을 가지는 기판을 사용하는 것이 고품질 epitaxial 층 성장에 적합할 것이라 생각된다. 또한 표면 거칠기 특성을 향상시키기 위해서는 epi-layer의 성장 후 CMP 공정이 필수적일 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 연구는 2024년 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(No. 2019R1A6C1010045)과 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원(2021M3H4A3A01061784)과 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구임.

## References

- [ 1 ] M. Higashiwaki and G.H. Jessen, "Guest editorial: The dawn of gallium oxide microelectronics", *Appl. Phys. Lett.* 112 (2018) 060401.
- [ 2 ] S. Zhang, X. Lian, Y. Ma, W. Liu, Y. Zhang, Y. Xu and H. Cheng, "Growth and characterization of 2-inch high quality  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals grown by EFG method", *J. Semicond.* 39 (2018) 083003.
- [ 3 ] J.B. Varley, H. Peelaers, A. Janotti and C.G. Van de Walle, "Hydrogenated cation vacancies in semiconducting oxides: Origin of doping asymmetry", *J. Phys.: Condens. Matter* 23 (2011) 334212.
- [ 4 ] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. Goto and S. Yamakoshi, "Device-quality  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films fabricated by ozone molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Express* 5 (2012) 035502.
- [ 5 ] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui and S. Yamakoshi, "High-quality  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals grown by edge-defined film-fed growth", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 (2016) 1202A2.
- [ 6 ] H.W. Xue, H. Qiming, G.Z. Jian and S. Long, "An overview of the ultrawide bandgap Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor-based Schottky barrier diode for power electronics application", *Nanoscale Research Letters* 13 (2018) 1.
- [ 7 ] M. Higashiwaki and S. Fujita, editors, *Gallium Oxide: Materials Properties, Crystal Growth, and Devices* (Springer International Publishing, Cham, 2020).
- [ 8 ] P. Vogt and O. Bierwagen, "Reaction kinetics and growth window for plasma-assisted molecular beam epitaxy of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Incorporation of Ga vs. Ga<sub>2</sub>O desorption", *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) 072101.
- [ 9 ] P. Vogt and O. Bierwagen, "Kinetics versus thermodynamics of the metal incorporation in molecular beam epitaxy of (In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *APL Mater.* 4 (2016) 086112.
- [ 10 ] K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Growth temperature dependences of structural and electrical properties of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films grown on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) substrates by molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth* 392 (2014) 30.
- [ 11 ] G. Wagner, M. Baldini, D. Gogova, M. Schmidbauer, R. Schewski, M. Albrecht, Z. Galazka, D. Klimm and R. Fornari, "Homoepitaxial growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers by metal-organic vapor phase epitaxy", *Physica Status Solidi (a)* 211 (2014) 27.
- [ 12 ] X. Du, W. Mi, C. Luan, Z. Li, C. Xia and J. Ma, "Characterization of homoepitaxial  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films prepared by metal-organic chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth* 404 (2014) 75.
- [ 13 ] M. Orita, H. Ohta, M. Hirano and H. Hosono, "Deep-ultraviolet transparent conductive  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films", *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000) 4166.
- [ 14 ] T. Oshima, T. Nakazono, A. Mukai and A. Ohtomo, "Epitaxial growth of  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films by mist chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth* 359 (2012) 60.
- [ 15 ] H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q.T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar and A. Koukitu, "Homoepitaxial growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers by halide vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Express* 8 (2014) 015503.
- [ 16 ] Y. Oshima, E.G. Villora and K. Shimamura, "Halide vapor phase epitaxy of twin-free  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on sapphire (0001) substrates", *Appl. Phys. Express* 8 (2015) 055501.
- [ 17 ] Y. Oshima, E.G. Villora and K. Shimamura, "Quasi-heteroepitaxial growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on off-angled sapphire (0001) substrates by halide vapor phase epitaxy", *J. Cryst. Growth* 410 (2015) 53.
- [ 18 ] K. Goto, H. Murakami, A. Kuramata, S. Yamakoshi, M. Higashiwaki and Y. Kumagai, "Effect of substrate orientation on homoepitaxial growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by halide vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* 120 (2022) 102102.
- [ 19 ] K. Ogawa, N. Ogawa, R. Kosaka, T. Isshiki, T. Aiso, M. Iyoki, Y.Z. Yao and Y. Ishikawa, "AFM observation of etch-pit shapes on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) surface formed by molten alkali etching," *MSF* 1004 (2020) 512.
- [ 20 ] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata and M. Kasu, "Characterization of dislocation of halide vapor phase epitaxial (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by ultrahigh sensitive emission microscopy and synchrotron X-ray topography and its influence on Schottky barrier diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* 62(SF) (2023) SF1001.
- [ 21 ] A.A. Zarichny, P.N. Butenko and M.E. Boiko, "The analysis of the etch pits parameters in the (201) plane of the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate crystals", *Materials Physics and Mechanics* 51 (2023) 174.
- [ 22 ] Y. Liu, Z. Jin, L. Li, N. Xia, H. Zhuang and D. Yang, "Two types of etching pits in (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals grown by casting method", *Micro and Nanostructures* 176 (2023) 207541.