Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 34, No. 1 (2024) 1-7
https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2024.34.1.001

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Characterization of various crystal planes of beta-phase gallium oxide single crystal grown by the EFG method using multi-slit structure

Hui-Yeon Jang, Su-Min Choi, Mi-Seon Park, Gwang-Hee Jung, Jin-Ki Kang*, Tae-Kyung Lee**, Hyoung-Jae Kim** and Won-Jae Lee†

Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea
**AXEL, Jinju 52818, Korea*
***Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46938, Korea*

(Received January 26, 2024)
(Revised February 6, 2024)
(Accepted February 13, 2024)

Abstract β-Ga_2O_3 is a material with a wide band gap of ~4.8 eV and a high breakdown-voltage of 8 MV/cm, and is attracting much attention in the field of power device applications. In addition, compared to representative WBG semiconductor materials such as SiC, GaN and Diamond, it has the advantage of enabling single crystal growth with high growth rate and low manufacturing cost [1-4]. In this study, we succeeded in growing a 10 mm thick β-Ga_2O_3 single crystal doped with 0.3 mol% SnO_2 through the EFG (Edge-defined Film-fed Growth) method using multi-slit structure. The growth direction and growth plane were set to [010]/(010), respectively, and the growth speed was about 12 mm/h. The grown β-Ga_2O_3 single crystal was cut into various crystal planes (010, 001, 100, $\bar{2}$01) and surface processed. The processed samples were compared for characteristics according to crystal plane through analysis such as XRD, UV/VIS/NIR/Spec., Mercury Probe, AFM and Etching. This research is expected to contribute to the development of power semiconductor technology in high-voltage and high-temperature applications, and selecting a substrate with better characteristics will play an important role in improving device performance and reliability.

Key words β-Ga_2O_3, Edge-defined film-fed growth, Multi-slit die, Properties analysis

다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법으로 성장시킨 β-Ga_2O_3 단결정의 다양한 결정면에 따른 특성 분석

장희연, 최수민, 박미선, 정광희, 강진기*, 이태경, 김형재**, 이원재†**

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340
*(주)악셀, 진주, 47340
**한국생산기술연구원, 부산, 46938

(2024년 1월 26일 접수)
(2024년 2월 6일 심사완료)
(2024년 2월 13일 게재확정)

요 약 β-Ga_2O_3는 ~4.8 eV의 넓은 밴드 갭과 8 MV/cm의 높은 항복 전압을 가지는 물질로 전력소자의 응용 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 또한, 대표적인 WBG 반도체 소재인 SiC, GaN, 다이아몬드 등과 비교했을 때, 높은 성장률과 낮은 제조 비용으로 단결정 성장이 가능하다는 장점을 가진다[1-4]. 본 연구에서는 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG(Edge-defined Film-fed Growth) 법을 통해 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정을 성장시키는 데에 성공했다. 성장 방향과 성장 면은 각각 [010]/(001)로 설정하였으며 성장 속도는 약 12 mm/h이다. 성장시킨 β-Ga_2O_3 단결정은 다양한 결정면(010, 001, 100, $\bar{2}$01)으로 절단하여 표면 가공을 진행하였다. 가공이 완료된 샘플은 XRD, UV/VIS/NIR Spec., Mercury Probe, AFM, Etching 등의 분석을 통해 결정면에 따른 특성을 비교하였다. 본 연구는 고전압 및 고온 응용 분야에서 전력반도체 기술의 발전에 기여할 것으로 기대되며 더 나은 특성의 기판을 선택하는 것은 소자의 성능과 신뢰성을 향상시키는 데에 중요한 역할을 할 것이다.

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

www.kci.go.kr

1. 서 론

Ga_2O_3는 Ga와 O가 결합하여 이루어진 화합물 반도체로서 약 1,800°C의 융점을 가지며 성장 조건에 따라 α, β, γ, δ 및 ε(또는 κ) 5종의 결정 다형으로 구분된다[5]. 5종의 결정 다형은 약 900°C 이상의 고온에서 열역학적으로 가장 안정한 상인 β-Ga_2O_3로 상전이가 일어난다[1]. 단사정계 구조의 β-Ga_2O_3는 SiC, GaN 등과 비교했을 때, 넓은 밴드 갭(~4.8 eV)과 높은 항복 전압(8 MV/cm) 등 뛰어난 물리적 특성을 가지는 초광대역 밴드 갭(UWBG) 반도체 소재이며, 극한 환경에서 작동할 수 있는 재료로 주목받고 있다[2-5]. Ga_2O_3의 대표적인 액상 성장법에는 EFG, CZ, FZ, VB 등이 있다. 그 중에서 EFG 법은 다른 액상 성장법과 비교했을 때 성장 속도가 빨라 대량 생산에 유리하고 대구경의 결정 성장이 가능할 뿐만 아니라 이리듐 도가니 형상 제어를 통해 결정 형상 제어가 가능하다는 특징이 있어 대표적으로 사용되는 성장법이다[6]. β-Ga_2O_3 단결정은 결정면에 따라 다른 특성을 가지기 때문에 응용 분야에 적합한 결정면을 선택하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법을 통해 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정을 성장시키는 데에 성공하였고, 성장시킨 단결정을 (010), (001), (100), (-201)의 결정면으로 가공하여 다양한 특성 분석을 진행하였다. 본 연구는 전력반도체 기술의 발전에 기여할 것으로 기대되며 더 나은 특성의 기판을 선택하는 것은 소자의 성능과 신뢰성 향상에 중요한 역할을 할 것이다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법을 통해 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정 성장에 성공하였다. Figure 1에 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법의 개략도와 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정을 나타냈다. 성장시킨 β-Ga_2O_3 단결정은 O_2 분위기에서 1,490°C로 10시간 동안 1차 열처리를 진행한 후, Single Wire Saw 장비를 이용하여 다양한 결정면으로 절단하였다. 절단한 샘플은 O_2 + N_2 분위기에서 1,490°C로 10시간 동안 2차 열처리를 진행한 후, DMP/CMP 장비를 이용하여 표면 연마를 진행하였다[7]. 다양한 결정면으로 절단한 샘플의 크기는 약 15 mm × 15 mm × 0.5 mm이며, 각 샘플의 사진은 Fig. 2에 나타냈다. 먼저, MP-XRD 장비를 이용하여 Theta-2theta scan을 통해 각 샘플의 결정면을 확인하였고, HR-XRD 장비를 이용한 Rocking Curve 분석을 통해 각 샘플의 결정 품질을 확인하였다. 다음으로, UV/VIS/NIR Spec.와 Mercury Probe 장비를 이용하여 각

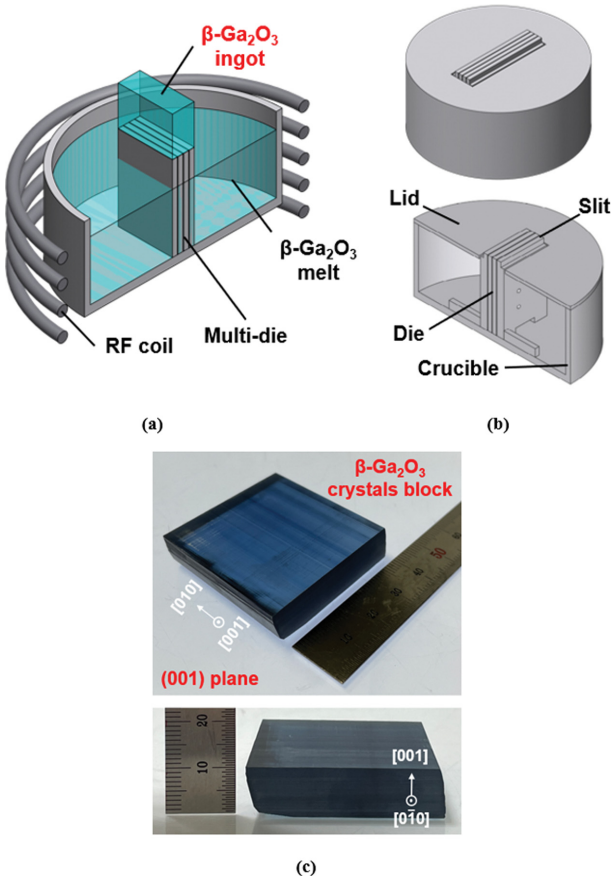

Fig. 1. (a) EFG method schematic, (b) Multi-slit structure, (c) β-Ga_2O_3 single crystal and thickness image.

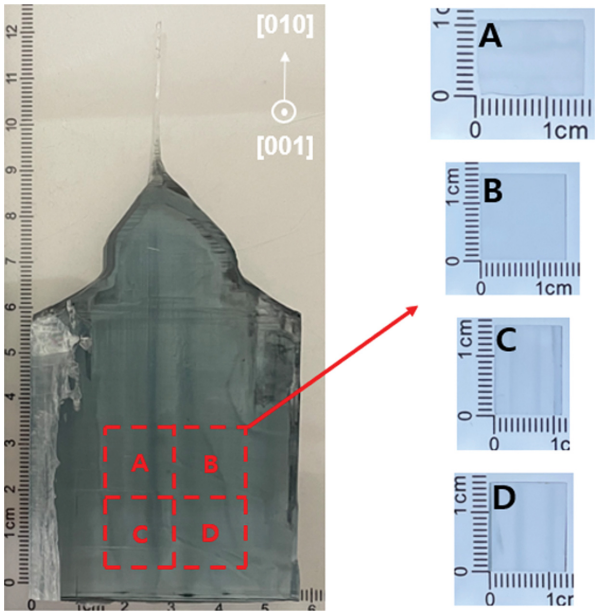

Fig. 2. Samples cut from β-Ga_2O_3 single crystal; A(010), B(001), C(100), D(201) plane.

www.kci.go.kr

샘플의 투과도 및 캐리어 농도를 측정하였다. 마지막으로, AFM 장비를 이용한 각 샘플의 표면 거칠기(Ra) 및 표면 이미지 분석과 인산 용액을 이용한 Etching을 통해 결함 형태 및 결함 밀도 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

실험 방법에서 언급한 바와 같이 분석에 사용된 샘플은 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법을 통해 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정을 다양한 면방향에 따라 절단하여 추출했으며, (010) 면을 A, (001) 면을 B, (100) 면을 C, ($\bar{2}$01) 면을 D라고 지칭하였다.

먼저, 추출한 샘플의 결정면을 확인하기 위해 융합부품소재 핵심연구지원센터 장비인 Multi-Purpose X-ray Diffractometer(MP-XRD)(Cu-Kα radiation with λ = 1.5406 Å, X'Pert-PRO MPD, PANalytical, Holland) 장비를 이용하여 Theta-2theta scan 10°~80° 구간에서 분석을 진행하였으며 다양한 면방향에 따른 결정 품질을 비교하기 위해 High-Resolution X-ray Diffractometer (HR-XRD)(Cu-Kα radiation with λ = 1.5406 Å, X'Pert-PRO MRD, PANalytical, Holland) 장비를 이용하여 Rocking Curve 분석을 진행하였다. 분석 결과, Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 A 샘플은 (020) 면의 회절각에 해당하는 60.85°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 129 arcsec였다. B 샘플은 (002), (004) 면의 회절각에 해당하는 31.75°, 66.25°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 36 arcsec, C 샘플은 (100), (200), (300), (400) 면의 회절각에 해당하는 14.95°, 30.05°, 45.75°, 62.55°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 100 arcsec였다. 마지막으로 D 샘플은 ($\bar{4}$02) 면의 회절각에 해당하는 38.45°에서 peak가 관찰되었으며 FWHM은 26 arcsec였다. 다양한 면방향에 따른 샘플의 FWHM 값은 β-Ga_2O_3 웨이퍼 시장의 선두에 있는 NCT(Novel Crystal Technology) 사의 FWHM 값과 비교할 수 있다[8]. 이를 통해 단결정 성장 과정에서 뒤틀리거나 휘어짐 없이 성장 방향인 [010] 방향으로 잘 성장되었으며 샘플 절단 과정에서 miscut이 발생하지 않았음을 알 수 있고 결정 품질 분석 결과 (001), ($\bar{2}$01) 면의 결정질이 가장 우수함을 확인하였다.

다음으로 다양한 면방향에 따른 샘플의 광학적 특성을 비교하기 위해 융합부품소재 핵심연구지원센터 장비인 UV/VIS/NIR Spectrophotometer(CARY 5, Varian,

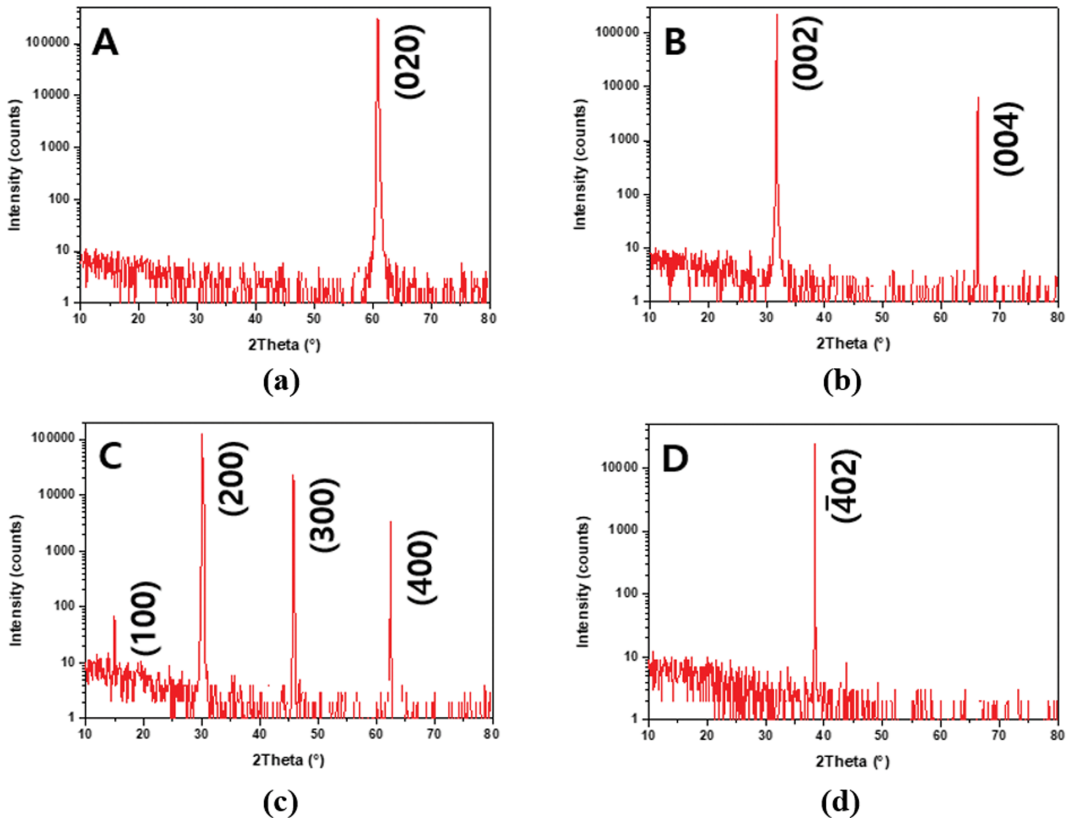

Fig. 3. Theta-2theta scan analysis results of various crystal planes using multi-purpose X-ray diffractometer; (a) A(010), (b) B(001), (c) C(100), (d) D($\bar{2}$01) plane.

www.kci.go.kr

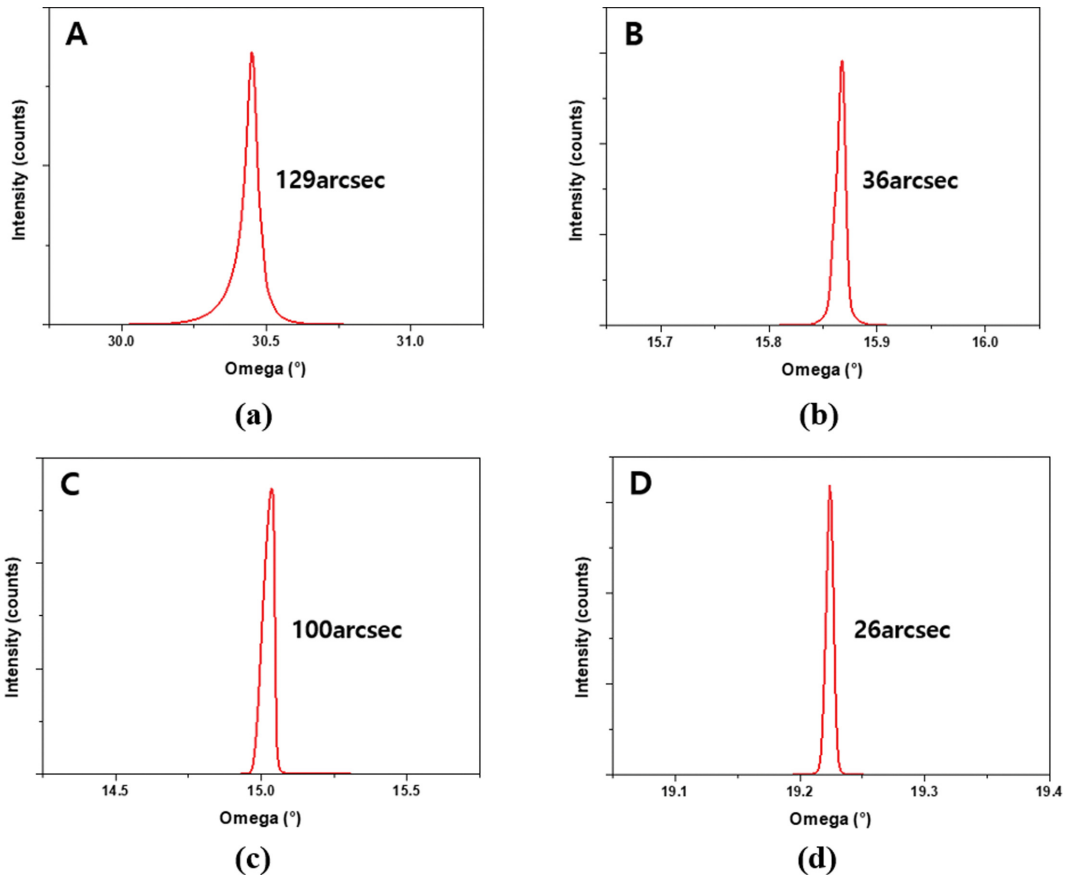

Fig. 4. Rocking curve analysis results of various crystal planes using high-resolution X-ray diffractometer; (a) A(010), (b) B(001), (c) C(100), (d) D(201).

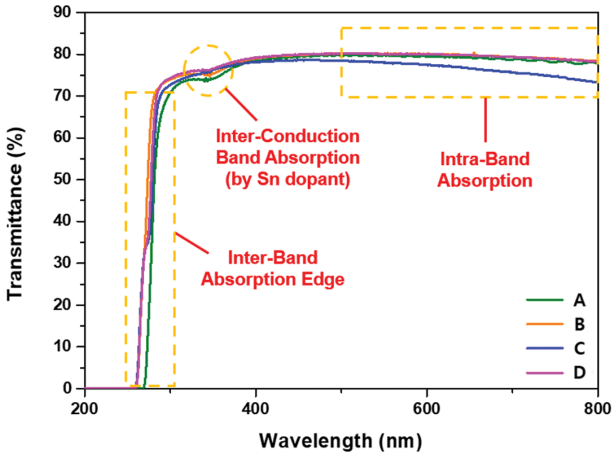

Fig. 5. Transmittance analysis results of various crystal planes using UV/VIS/NIR Spec.; A(010), B(001), C(100), D(201).

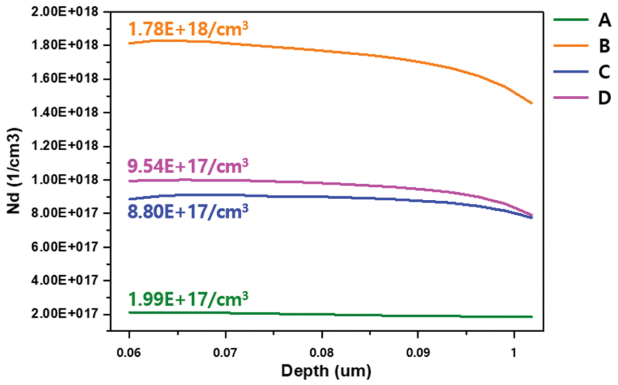

Fig. 6. Carrier concentration analysis results of various crystal planes using mercury probe; A(010), B(001), C(100), D(201).

Australia) 장비를 이용하여 200~800 nm 범위에서 투과도 분석을 진행하였다. 분석 결과, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 A, B, C, D 샘플 모두 약 80 %에 해당하는 높은 투과율을 가지는 것을 확인할 수 있었으며 면방향에 따른 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 특이한 점으로는 그래프 상에서 3개의 흡수 영역을 확인할 수 있다; 1) 260~273 nm : 도핑 농도와 상관없이 관찰되는 Ga_2O_3 물질 고유의 흡수 영역 - 이 영역 내 270 nm 부근에서는 Sn 도핑에 의해 자유전자가 대량 생산됨으로써 큰 에너지 흡수가 일어나 가장 낮은 전도대에서 3번째 전도대로 전자의 이동이 발생함(K → M). 2) 약 350 nm : 270 nm 부근에서 관찰되는 흡수 영역과 마찬가지로 Sn 도핑에 의해 전도대 내 낮은 준위에서 높은 준위로 전자의 이동이 관찰되는 영역(K → L). 3) 500~800 nm : 파

www.kci.go.kr

장 의존성 및 편광 독립적 흡수에 의해 관찰되는 영역 - 이 영역에선 전자의 준위 간 이동은 관찰되지 않지만 같은 전도대 내 전자의 스테이트 이동이 관찰됨[9,10].

다양한 면방향에 따른 샘플의 전기적 특성은 Mercury Probe(802B-200-6", MDC, USA) 장비를 이용하였으며 각 샘플의 캐리어 농도를 비교 분석하였다. β-Ga_2O_3 단결정을 전력반도체용 기판으로 사용하기 위해서는 ~E+18/cm^3에 해당하는 캐리어 농도를 만족해야 하지만 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 B 샘플을 제외한 A, C, D 샘플은 ~E+18/cm^3에 해당하는 캐리어 농도에 미치지 못함을 확인하였다. 이는 단결정 성장 실험에서 진행한 SnO_2의 도핑 함량이 낮다는 것을 의미하므로 0.5~1 mol% 이내로 도핑 함량을 늘릴 필요성이 있다. 또한, 면방향에 따른 샘플의 캐리어 농도는 오차범위 내에서 약간의 차이가 존재하며 (001) 면에 해당하는 B 샘플의 캐리어 농도가 가장 높음을 확인하였다. 이를 통해 (001) 면에서 n-type dopant인 Sn 원자가 Ga 원자 site에 가장 안정적으로 치환됨을 유추할 수 있다.

다음은 융합부품소재 핵심연구지원센터 장비인 Atomic Force Microscope(SPA-400, Seiko Instruments, Japan) 장비를 이용하여 각 샘플의 표면 이미지 및 표면 거칠기 분석을 진행하였다. 2D 이미지는 5 μm × 5 μm 범위에서

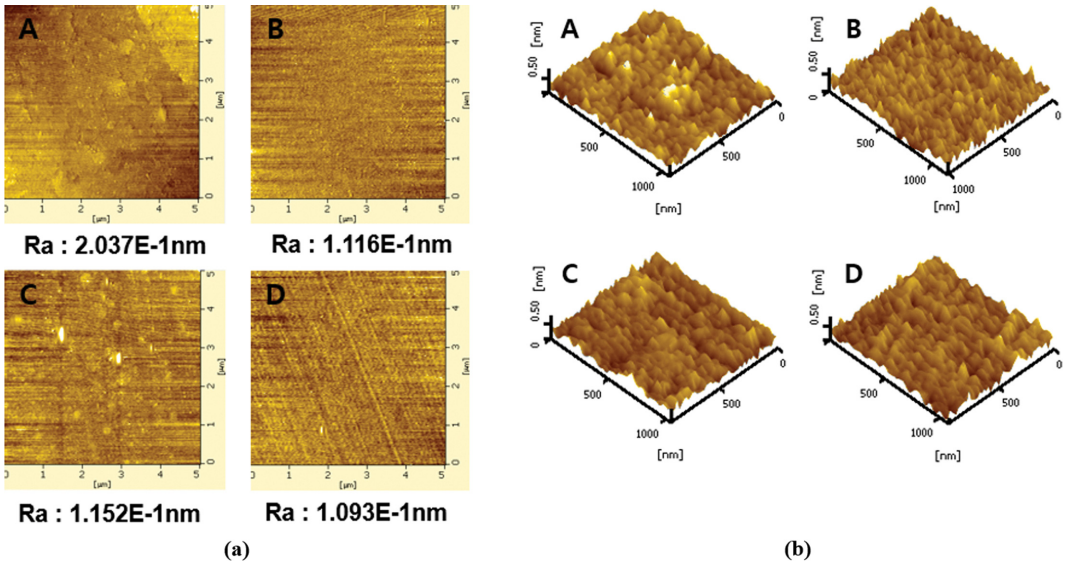

Fig. 7. Surface image analysis results of various crystal planes using AFM; (a) 2D surface image, (b) 3D surface image; A(010), B(001), C(100), D($\bar{2}$01).

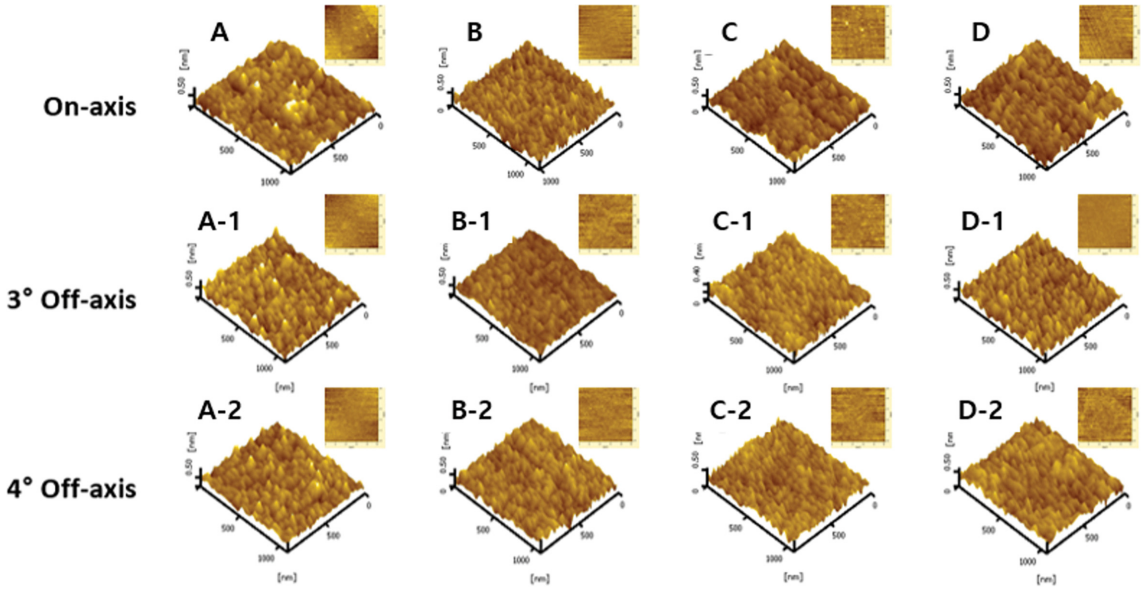

Fig. 8. Surface image analysis results of various crystal planes using AFM; On-axis_A(010), B(001), C(100), D($\bar{2}$01), 3° Off-axis_ A-1(010), B-1($\bar{2}$01), C-1(100), D-1($\bar{2}$01), 4° Off-axis_ A-2(010), B-2(001), C-2(100), D-2($\bar{2}$01).

www.kci.go.kr

Table 1
Surface roughness analysis results of various crystal planes using AFM

Ra(nm)	(010)	(001)	(100)	($\bar{2}$01)
On-axis	2.037E-1	1.116E-1	1.152E-1	1.093E-1
3° Off-axis	1.427E-1	1.048E-1	9.028E-2	1.558E-1
4° Off-axis	1.415E-1	1.106E-1	8.121E-2	1.055E-1

측정을 진행하였으며 측정 범위 내에서 1 μm × 1 μm 범위를 임의로 지정하여 3D 이미지를 확인한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 분석 결과, 면방향에 따른 샘플의 표면 거칠기 값은 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 추가적으로 Off-axis의 각도가 샘플 표면에 미치는 영향에 대해 확인하기 위해 면방향에 따른 샘플을 offcut 하여 동일한 분석을 진행한 결과를 Fig. 8과 Table 1에 나타냈다. Off-axis의 각도가 커질수록 표면 거칠기 값이 감소하는 경향을 확인하였다.

마지막으로, H_3PO_4 용액을 사용해 140°C에서 20분 간격으로 총 2시간 Etching 진행한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 100배율 렌즈로 면방향에 따른 샘플의 표면을 광학 현미경을 이용해 관찰했을 때, (010) 면의 샘플에서는 공극에서 기원된 Rhombus shape의 결함, (001) 면의 샘플에서는 전위에서 기원된 Cannonball shape의 결함, (100), ($\bar{2}$01) 면의 샘플에서는 전위에서 기원된 Bullet shape의 결함이 관찰되었다[11-14]. 면방향에 따른 샘플의 EPD(Etch Pit Density)는 약 $<10^5/cm^2$이며 상, 하, 좌, 우, 중앙 총 5 point를 측정하여 면적 당 결함 수의 평균으로 계산하였다. 현재 전 세계적으로 β-Ga_2O_3 웨이퍼 시장을 독점하고 있는 NCT(Novel Crystal Technology) 사 웨이퍼의 EPD 값과 본 결과를 비교했을 때, 약 100배 이상 차이가 나는 것을 확인하였다[6]. 이는 국내 β-Ga_2O_3 단결정 성장의 공정 최적화에 대한 연구가 활발히 이루어져야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 다중 슬릿 구조를 이용한 EFG 법을 통해 SnO_2 0.3 mol% 도핑된 10 mm 두께의 β-Ga_2O_3 단결정 성장에 성공하였다. 성장한 단결정은 다양한 면방향으로 절단하여 표면 가공을 진행하였으며 샘플의 특성 분석을 통해 전력반도체용 기판으로써 최적화된 면방향을 조사하고자 하였다.

(001)/[010]으로 성장한 β-Ga_2O_3 단결정을 면방향에 따라 절단하여 MP-XRD, HR-XRD를 통해 결정면 및 결정 품질 분석을 진행한 결과, 각 샘플은 (010), (001), (100), ($\bar{2}$01) 면으로 miscut 없이 절단되었으며 (001), ($\bar{2}$01) 면의 결정 품질이 가장 우수함을 확인하였다. 다음으로 UV/VIS/NIR Spec.을 통한 투과도 분석을 진행한 결과, 면방향에 따른 샘플의 차이는 뚜렷하게 관찰되지 않았고, n-type dopant인 Sn 원자가 Ga 원자 site에

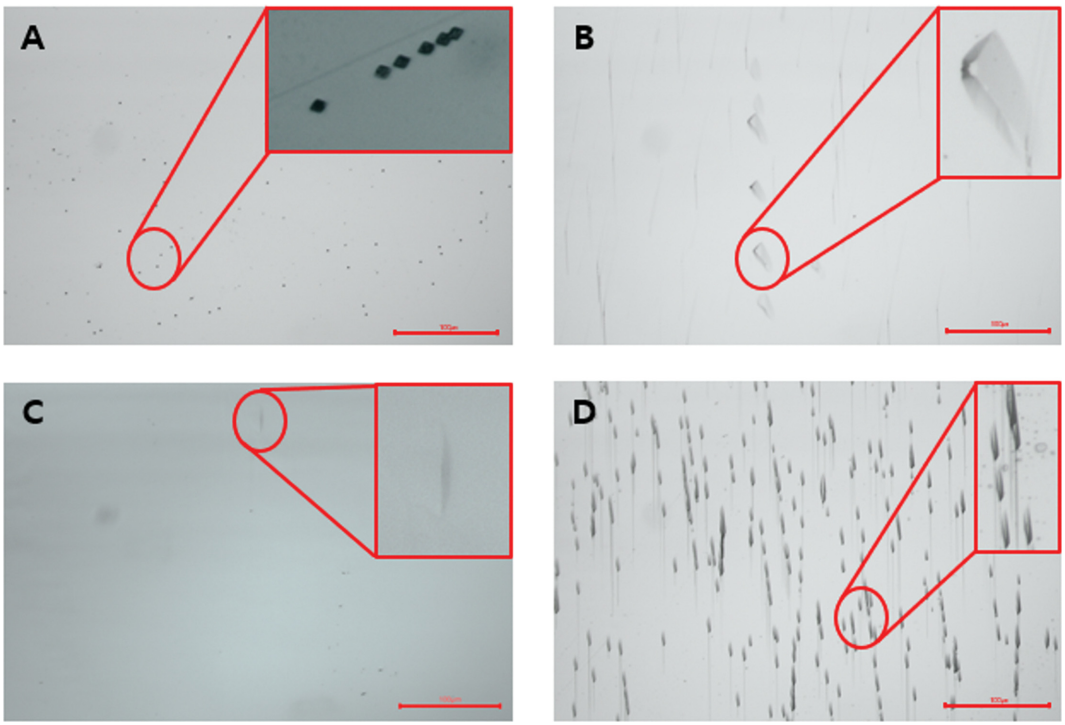

Fig. 9. Defect shape analysis results of various crystal planes using etching; A(010), B(001), C(100), D($\bar{2}$01). * Red box : Defects observed at X200.

www.kci.go.kr

치환됨에 따라 특정 영역에서 흡수가 일어나는 것을 확인하였다. Mercury Probe를 통한 전기적 특성 분석에서는 (001) 면의 캐리어 농도가 가장 높은 것을 확인하였으며 AFM을 통한 표면 거칠기 분석에서는 면방향에 따른 샘플의 경향성은 확인할 수 없었다. 마지막으로 H_3PO_4 용액을 이용한 Etching을 통해 결함 분석을 진행한 결과, 면방향에 따른 샘플의 표면 결함 형태에 차이가 있는 것을 확인하였으며 EPD의 차이는 거의 없었다.

위 분석 결과를 통해 소자의 성능과 신뢰성을 향상시키는 데에 있어 가장 적합한 β-Ga_2O_3 단결정 기판의 면방향은 (001) 면이라고 결론지었으며, 향후 본 연구에서 더 나아가 기판의 Off-axis에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(20017105)과 2024년 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(No. 2019R1A6C1010045), 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구임.

References

[1] H. Xue, Q. He, G. Jian, S. Long, T. Pang and M. Liu, “An overview of the ultrawide bandgap Ga_2O_3 semiconductor-based schottky barrier diode for power electronics application”, Nanoscale Res. Lett. 13 (2018) 1.

[2] J.Y. Tsao, S. Chowdhury, M.A. Hollis, D. Jena, N.M. Johnson, K.A. Jones, R.J. Kaplar, S. Rajan, C.G. Van de Walle, E. Bellotti, C.L. Chua, R. Collazo, M.E. Coltrin, J.A. Cooper, K.R. Evans, S. Graham, T.A. Grotjohn, E.R. Heller, M. Higashiwaki, M.S. Islam, P.W. Juodawlkis, M.A. Khan, A.D. Koehler, J.H. Leach, U.K. Mishra, R.J. Nemanich, R.C.N. Pilawa-Podgurski, J.B. Shealy, Z. Sitar, M.J. Tadjer, A.F. Witulski, M. Wraback and J.A. Simmons, “Ultrawide-bandgap semiconductors: research opportunities and challenges”, Adv. Electron. Mater. 4 (2018) 4.

[3] M. Higashiwaki and G.H. Jessen, “Guest Editorial: The dawn of gallium oxide microelectronics”, Appl. Phys. Lett. 112 (2018) 2.

[4] K. Zhang, Z. Xu, J. Zhao, H. Wang, J. Hao, S. Zhang, H. Cheng and B. Dong, “Temperature-dependent Raman and photoluminescence of β-Ga_2O_3 doped with shallow donors and deep acceptors impurities”, J. Alloys and Compounds 881 (2021) 1.

[5] S. Zhang, X. Lian, Y. Ma, W. Liu, Y. Zhang, Y. Xu and H. Cheng, “Growth and characterization of 2-inch high quality β-Ga_2O_3 single crystals grown by EFG method”, J. Semiconductors 39 (2018) 2.

[6] M. Higashiwaki, Z. Galazka, K. Hoshikawa, A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, A. Mauze, J. Speck, O. Bierwagen, P. Vogt, P. Mazzolini, K. Sasaki, S. Yamakoshi, F. Alema, A. Osinsky, Y. Yao, R.F. Davis, L.M. Porter, Y. Kumagai, K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, B. Monemar, Y. Oshima, S. Fujita, H. Nishinaka, K.D. Leedy, H. Wenckstern, D. Splith, M. Grundmann, H. Zhao, H. Peelaers, C.G. Van de Walle, J.B. Varley, O. Ueda, H. Yamaguchi, F. Tuomisto, A.T. Neal, S. Mou, K. Ghosh, A. Kumar, U. Singisetti, A.R. Arehart, S.A. Ringel, M.J. Tadjer, V.D. Wheeler, D.I. Shashin, M. Kasu, T. Onuma, M. Schubert, A. Mock, R. Korlacki, S. Knight, G. Wagner, V. Darakchieva, Z. Liu, T. Luo, T. Yanagida, G. Okada, N. Kawaguchi, N. Moser, A. Green, K. Chabak, E. Heller, G. Jessen, M. H. Wong, Y. Zhang, S. Krishnamoorthy, S. Rajan, H. Zhou, J. Noh, H. Bae, M. Si, P.D. Ye, Z. Hu, W. Li, H.G. Xing, J. Yang, M. Xian, R. Elhassani, F. Ren, S.J. Pearton, P. Schlupp, H. Wenckstern, T. Oshima, K. Mineo and D. Jena, “Gallium oxide: Materials properties, crystal growth, and devices”, M. Higashiwaki, Ed., S. Fujita, Ed., Vol. 293 (Springer International Publishing, Cham, 2020) p. 1.

[7] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui and S. Yamakoshi, “High-quality β-Ga_2O_3 single crystals grown by edge-defined film-fed growth”, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 5.

[8] S. Bae, “Growth of various phases of gallium oxide”, Enc. Appl. Phys. WILEY-VCH GmbH (2021) 12.

[9] A. Singh, O. Koksal, N. Tanen, J. McCandless, D. Jena, H. (Grace) Xing, H. Peelaers and F. Rana, “Intra- and inter-conduction band optical absorption processes in β-Ga_2O_3”, Appl. Phys. Lett. 117 (2020) 1.

[10] H. Peelaers and C.G. Van De Walle, “Sub-band-gap absorption in Ga_2O_3”, Appl. Phys. Lett. 111 (2017) 2.

[11] K. Hanada, T. Moribayashi, K. Koshi, K. Sasaki, A. Kuramata, O. Ueda and M. Kasu, “Origins of etch pits in β-Ga_2O_3(010) single crystals”, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 3.

[12] 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 β-Ga_2O_3(001) surface formed by molten alkali etching”, MSF. 1004 (2020) 3.

[13] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata and M. Kasu, “Characterization of dislocation of halide vapor phase epitaxial (001) β-Ga_2O_3 by ultrahigh sensitive emission microscopy and synchrotron X-ray topography and its influence on Schottky barrier diodes”, Jpn. J. Appl. Phys. 62 (2023) 6.

[14] T. Taishi, N. Kobayashi, E. Ohba and K. Hoshikawa, “Line-shaped defects in bulk β-Ga_2O_3 single crystals grown by the vertical Bridgman method”, Jpn. J. Appl. Phys. 62 (2023) 3.

www.kci.go.kr