

Growth of Fe-doped semi-insulating β -Ga₂O₃ single crystals by EFG method and optimization of Fe doping conditions

Sun-Yeong Seo, Mi-Seon Park, Gwang-Hee Jung, Jin-Ki Kang*, Yun-Ji Shin**, Seong-Min Jeong**, Jung-Gon Kim† and Won-Jae Lee†

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

**AXEL, Jinju 52818, Korea*

***Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea*

(Received September 1, 2026)

(Revised September 8, 2026)

(Accepted September 8, 2026)

Abstract To achieve high-power performance in β -Ga₂O₃-based lateral power devices, it is indispensable to ensure a high breakdown voltage and suppress surface channel leakage currents. These requirements can be realized by using semi-insulating substrates with high electrical resistivity. Unintentionally doped (UID) β -Ga₂O₃ typically exhibits *n*-type conduction due to residual impurities in the source material (such as Si, Sn, and Ge) and oxygen vacancies (*V_o*) formed during crystal growth. Thus, charge compensation using deep acceptor dopants (such as Mg and Fe) is necessary to trap free electron carriers and obtain high resistivity. In this study, UID (001)-oriented and Fe-doped (100)-oriented β -Ga₂O₃ single crystals were grown using the edge-defined film-fed growth (EFG) method. The crystal orientation, crystal quality, defect morphology, EPD (etch pit density), optical properties, and electrical characteristics were evaluated for β -Ga₂O₃ samples grown with different Fe concentrations (0 mol%, 0.005 mol%, 0.01 mol%, and 0.02 mol%). The results showed that as the Fe doping concentration increased, the EPD increased, leading to a decrease in crystal quality and optical transmittance. On the other hand, SIMS analysis confirmed that for the samples with 0.01 mol% and 0.02 mol% Fe, the Fe dopant concentration was higher than the residual Si impurity concentration. This proves that the Si donors were effectively compensated by the Fe dopants. The electron traps formed by Fe doping significantly reduced the free electron concentration, leading to a large increase in resistivity. As a result, a semi-insulating β -Ga₂O₃ substrate with a high resistivity (*r*) of approximately $5 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ($n = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) was successfully demonstrated at a doping condition of 0.02 mol% Fe.

Key words β -Ga₂O₃, EFG growth, Fe-doping, Semi-insulating substrate, Charge compensation, Resistivity

EFG법을 이용한 Fe-doped 반절연 β -Ga₂O₃ 단결정 성장 및 Fe 최적 도핑 조건 연구

서선영, 박미선, 정광희, 강진기*, 신윤지**, 정성민**, 김정곤†, 이원재†

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

*AXEL, 진주, 52818

**한국세라믹기술원, 진주, 52851

(2026년 9월 1일 접수)

(2026년 9월 8일 심사완료)

(2026년 9월 8일 게재확정)

요약 β -Ga₂O₃ 기반 가로형 전력 소자의 고전력화를 위해서는 높은 절연과피 전압 확보와 표면채널을 통한 누설전류 차단이 필수적이며 이는 높은 비저항을 갖는 반절연성 기관으로 실현될 수 있다. Unintentionally-doped (UID) β -Ga₂O₃의 경우 소스 원료 내 잔류 불순물(Si, Sn 및 Ge 등)의 영향과 결정 성장 중 발생하는 산소 공공(*V_o*)에 의해 일반적으로 *n*-type

†Corresponding author

E-mail: kimjg@deu.ac.kr, leewj@deu.ac.kr

Copyright © 2026 The Korean Association of Crystal Growth Open

Access article under the CC BY-NC 4.0 license

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

전도 특성을 나타낸다. 자유 전자 캐리어를 효율적으로 포획할 수 있는 deep acceptor(Mg, Fe 등) 도핑을 통해 전하 보상이 필요하며, 반절연성 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기판 제작을 위해 보다 높은 비저항의 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 EFG(Edge-Defined Film-Fed Growth)법을 사용하여 unintentionally-doped(UID) (001)면과 Fe를 보상 도펀트로 첨가한 Fe-doped (100)면 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정을 성장시켰다. UID 및 Fe 몰분율(0 mol%, 0.005 mol%, 0.01 mol%, 0.02 mol%)을 달리하여 성장시킨 단결정의 결정 방향, 결정성, 결함 형상 및 결함 밀도(EPD), 광학적·전기적 특성을 평가하였다. 분석 결과, Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 결함 밀도가 증가하면서 결정 품질 및 광학적 투과율이 감소하는 경향을 보였다. 한편, SIMS 분석을 통해 Fe 몰분율 0.01 mol% 및 0.02 mol% 샘플에서 Fe 도펀트 농도가 잔류 Si 불순물 농도를 상회함을 확인하였으며, 이는 Si donor가 Fe 도펀트에 의해 유효하게 보상되었음을 시사한다. 이러한 Fe 도핑에 의한 전자 트랩 형성은 자유 전자 농도를 크게 감소시켜 비저항을 크게 향상시켰다. 결과적으로 0.02 mol%의 Fe가 도핑된 조건에서 약 $\sim 5 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ($n = \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 수준의 높은 비저항을 갖는 반절연 기판이 성공적으로 구현되었다.

1. 서 론

전력반도체는 전기에너지를 효율적으로 변환하고 제어하기 위한 핵심부품으로, 최근 AI 고성능 컴퓨팅 및 친환경 모빌리티의 확산으로 고온 및 고전압 환경에서의 안정적인 동작, 높은 전력 변환 효율과 소형화를 실현할 수 있는 차세대 전력반도체 소자의 수요가 급증하고 있다. 이에 SiC(Silicon Carbide)와 GaN(Gallium Nitride)과 같은 와이드밴드갭 (Wide bandgap) 반도체가 기존 Si 기반 전력반도체를 점차 대체하며 차세대 전력반도체 기판소재 시장에 성공적으로 상용화되었다. 한편, 산화물 반도체인 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 약 4.8 eV의 보다 넓은 초광대역 에너지 밴드갭과 8 MV/cm에 달하는 높은 절연파괴 전계를 기반으로 초고내압·저손실 전력반도체용 기판소재로 주목받고 있다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 기존의 와이드밴드갭 전력반도체 기판소재 기반의 쇼트키 장벽 다이오드(Schottky barrier diode, SBD), 전계효과 트랜지스터(Field-Effect Transistor, FET) 및 심자외선 광검출기 등 다양한 적용 가능성이 꾸준히 보고되고 있다[1-3].

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 SiC 및 GaN과 달리 액상 성장법을 이용한 단결정 성장이 가능하여 기판 제작 비용 및 에너지를 대폭 절감할 수 있다는 장점이 있다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정은 용액 기반 성장법인 Czochralski(CZ), Floating Zone(FZ), Vertical Bridgman(VB) 및 Edge-Defined Film-Fed Growth(EFG) 등의 방법으로 성장이 이루어지고 있다. 최근, 고가의 귀금속 도가니를 사용하지 않는 캐스팅법(자발 핵생성법)과 일본 NCT 사에 의해 새롭게 선보인 drop-fed growth(DG)법 등이 보고되고 있다[4]. 이 중 EFG법은 상대적으로 높은 성장 속도와 이리듬 도가니의 다이(die)를 이용한 결정 형상 제어가 비교적 용이해 대구경 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기판 제작에 적합한 성장법으로 활용되고 있다[5].

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기반 가로형 전력 소자의 고전력화를 위해서는 높은 절연파괴 전압 확보와 표면채널을 통한 누설전류의 억제가 필수적이며 이는 높은 비저항을 갖는 반절연성 기판으로 실현될 수 있다. 그러나 unintentionally-doped (UID) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 Si, Sn 및 Ge 등의 소스 원료 내 잔

류 불순물의 영향과 결정 성장 중 발생하는 산소 공공(V_O)에 의해 일반적으로 n -type 전도 특성을 나타내며, 약 10^{17} cm^{-3} 의 전자 농도와 $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 수준의 낮은 비저항을 갖는 것으로 보고되고 있다. 따라서 자유 캐리어를 포획할 수 있는 deep acceptor 도핑을 통해 전하 보상이 필요하며, Fe와 Mg 등이 반절연 특성을 구현하기 위한 도펀트로 사용될 수 있다. 가장 일반적으로 사용되는 Fe 도핑의 경우, Fe^{3+} 의 이온 반경이 Ga^{3+} 와 유사하여 Ga^{3+} 사이트를 대체하기 때문에 결정 내 격자 왜곡 및 결함 발생을 최소화할 수 있다. Fe는 고온에서 낮은 평형 증기압을 가지므로 성장 과정에서의 휘발이 적어 균일한 도핑 농도를 확보할 수 있다는 장점이 있다[6,7]. 또한, 성장된 단결정을 고온 산소분위기에서 열처리함으로써 산소 결함을 보상하며, 갈륨 공공 관련 결함체(V_{Ga} -Sn complexes) 형성을 유도하여 반절연 특성을 더욱 강화할 수 있다고 보고되고 있다[8].

본 연구에서는 반절연성 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기판 제작을 위해 Fe를 보상 도펀트로 적용하고, Ga_2O_3 분말에 FeO를 첨가하여 Fe 0.005 mol%, 0.01 mol% 및 0.02 mol%의 혼합 분말을 제조하였다. 이를 이용하여 EFG법으로 주 결정면이 각각 (001) 면과 (100) 면이 되도록 성장 방향을 [010]로 배향하여 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정을 성장시켰다. 성장된 판상형의 잉곳으로부터 정사각형의 샘플로 추출하고 표면을 경면 폴리싱하여 준비하였다. Fe 각 도핑 농도에 따른 단결정의 결정성 및 결정 품질, 표면 및 광학 특성, Fe를 포함한 불순물 농도와 전기적 특성의 변화를 체계적으로 분석하였다. Fe 도핑된 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정의 결정성과 결정 품질은 HR-XRD(High resolution x-ray diffraction)와 H_3PO_4 를 이용한 표면 식각을 통해 평가하였다. UV/VIS/NIR spectroscopy를 통해 결정의 투과도와 도펀트 원소에 기인한 흡수단을 분석하였고, 결정 깊이 방향에 따른 Fe 원소의 농도를 SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)를 통해 분석하였다. 나아가 비접촉식 저항 매핑기를 이용하여 각 샘플의 비저항을 분석하였다. 본 연구에서는 Fe 도핑 농도에 따른 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정 제조와 다양한 물성 평가를 기반으로 반절연성 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기판 제작을 위한 적정 Fe 도핑 조건을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

Figure 1에 β -Ga₂O₃ 단결정 성장에 사용된 EFG 성장로 모식도(Fig. 1(a)) 및 이리듐 도가니 구조(Fig. 1(b))를 나타내었다. 원료는 순도 5 N(99.999 %)의 Ga₂O₃ 분말과 순도 3 N(99.9 %)의 FeO 분말을 사용하였으며, Ga₂O₃ 내 Fe와 Ga의 비율(Fe 도핑 농도)이 각각 0 mol%, 0.005 mol%, 0.01 mol% 및 0.02 mol%가 되도록 FeO 분말을 첨가하여 원료 분말을 준비하였다. 혼합된 원료 분말은 볼밀을 이용하여 6시간 동안 균일하게 혼합하였으며, 준비된 소스 분말은 Fig. 1(a) 중앙부에 회색으로 보이는 이리듐 도가니에 장입하였다. Figure 1(b)에 나타난 도가니 중앙의 수직 방향으로 위쪽을 향하고 있는 부분이 다이(die)이며, 중앙부 내부에 슬릿이 위치한다. 도가니의 단열을 위한 단열재 소재는 지르코니아와 알루미늄 나를 사용하였다. 본 성장을 위한 UID (001) 및 Fe-doped (100) β -Ga₂O₃ 각각의 단결정 시드 결정은 동일한 EFG 성장로를 이용하여 준비하였다. UID (001)면 성장에는 5 mm 두께의 시드 결정을 사용하였으며, Fe-doped (100)면 성장에는 10 mm 두께의 시드 결정을 사용하였다. HR-XRD를 이용한 ω -scan 결과, 각 시드 결정의 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)은 각각 122 arcsec 및 124 arcsec로 측정되었다. β -Ga₂O₃ 단결정 성장은 RF(Radio-frequency) 유도 코일을 이용한 유도 가열 방식으로 수행되었으며, 성장 분위기는 0.11 MPa의 압력에서 Ar:N₂ = 3:7의 혼합 가스를 사용하였다. β -Ga₂O₃의 용융점(약 1,800°C)에 도달하면 용융물이 모세관 현상에 의해 이리듐 다이의 슬릿을 따라 상승하여 다이 상단 표면에 도달하도록 하였으며, 이후 β -Ga₂O₃ 시드 결정을 다이 상단의 마중물과 접촉시켜 단결정 성장을 시행하였다. EFG법에서 성장되는 결정의 형상은 다이 상

단 표면의 형상에 의해 결정되므로 성장 후에는 직사각형의 판상형의 잉곳이 얻어진다. 결정의 성장 방향은 [010]이며, 주 결정면은 UID 샘플의 경우 (001)면으로 Fe-doped 샘플의 경우 (100)면으로 설정하였으며, 성장 속도는 15 mm/h로 조절하였다.

성장된 UID (001)면 및 Fe-doped (100)면 β -Ga₂O₃ 단결정의 상분석과 결정 품질은 고분해능 X선 회절 분석기(HR-XRD, Cu-K α radiation with $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, X'Pert-PRO MRD, PANalytical, The Netherlands)를 이용하여 θ -2 θ scan mode(10°~80°)와 ω -scan mode를 활용한 X-ray rocking curve를 통해 분석하였다. 또한 85 wt%의 H₃PO₄ 용액을 이용한 습식 식각(Etching)을 실시하여 결정 표면에 나타나는 결함의 형태와 밀도를 광학현미경(NiKon 80i, Japan)을 이용하여 분석하였다. Fe 도핑 농도에 따른 β -Ga₂O₃ 단결정 샘플의 광학적 특성은 UV/VIS/NIR Spectroscopy(Cary 5, Varian Inc., US)를 이용하여 200~800 nm 영역의 투과도를 측정하여 평가하였다. 각 결정의 Fe 도펀트 및 깊이방향에 따른 불순물 분포와 농도 변화를 확인하기 위해 2차 이온 질량 분석기(Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS, IMS-6f, CAMECA, France)를 이용하여 분석하였다. 샘플의 비저항은 비접촉식 비저항 측정기(COREMA-2000, Semilab, Hungary)를 이용하여 각 Fe 도핑 농도에 따른 전기적 특성 변화를 비교하였다. 이를 통해 Fe 도핑 농도에 따른 β -Ga₂O₃ 단결정의 결정 품질, 표면 결함, 광학적·전기적 특성 변화를 종합적으로 분석하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2에 EFG 방법을 사용하여 성장시킨 UID (001)

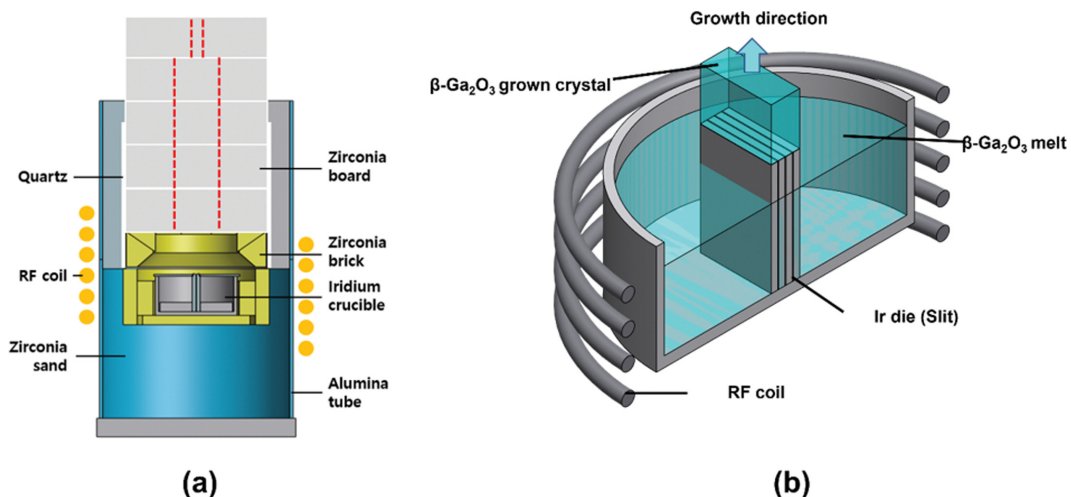


Fig. 1. Schematic diagram of the EFG growth system. (a) EFG growth furnace configuration and (b) detailed structure of the iridium crucible.

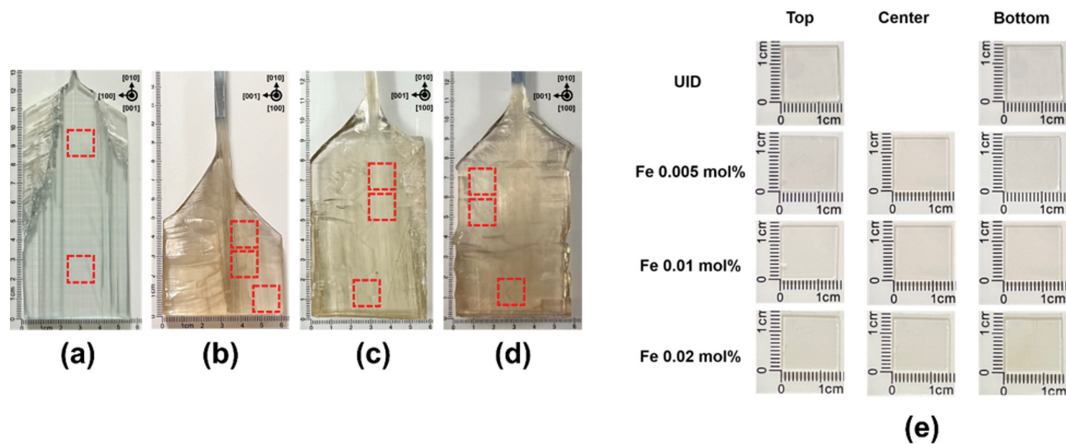


Fig. 2. β -Ga₂O₃ crystals with various Fe doping concentrations. (a) UID (0 mol%), (b) Fe 0.005 mol%, (c) Fe 0.01 mol%, and (d) Fe 0.02 mol%. (e) Rectangular samples prepared by mechanical polishing from three selected regions (top, center, and bottom) of the grown crystals. All sample have an identical size of 14.5 mm × 14.5 mm.

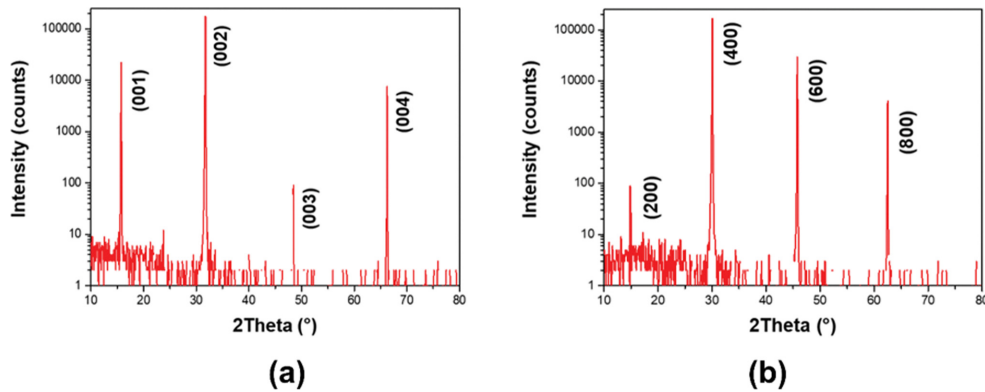


Fig. 3. XRD 2 θ -scans of (a) UID and (b) Fe-doped β -Ga₂O₃ crystals.

면 및 Fe 도핑 농도별 (100)면 β -Ga₂O₃ 단결정을 나타내었다. 육안으로 확인한 결과, UID (001)면 결정은 투명한 무색(Fig. 2(a))을 나타내지만, Fe 도핑이 진행된 0.005 mol%(Fig. 2(b)), 0.01 mol%(Fig. 2(c)) 및 0.02 mol% (Fig. 2(d))인 (100)면 결정들은 Fe 도펀트의 첨가로 대부분 투명하며 옅은 황갈색(HEX code:#D3B683)을 나타내었다. 소스 분말의 장입량에 따라 성장된 결정의 길이는 약 115~130 mm로 확인되었다. Figure 2(e)에 성장된 각 결정(Fig. 2(a)~(d))에서 Top, Center, Bottom 영역별(빨간색 점선 영역)로 추출하여 양면 연마한 UID (001) 및 Fe 도핑 농도별 (100) β -Ga₂O₃ 샘플을 나타내었다. 추출된 정사각형 샘플의 두께는 약 0.7~1.0 mm이며, 크기는 14.5 mm × 14.5 mm로 제작하였다.

제작된 UID (001)면 및 Fe-doped (100)면 β -Ga₂O₃ 샘플의 결정 방위와 결정 품질을 분석하기 위해 고분해능 X선 회절 분석기(HR-XRD)를 이용하였다. Figure 3은 UID (001)면 샘플과 Fe-doped (100)면 샘플에 대해 2 θ 스캔한 XRD 패턴을 나타낸다. Figure 3(a)에서 보듯 UID (001)면 샘플에서는 (001), (002), (003), (004)면에

해당하는 회절 peak가 관찰되어 성장된 결정의 주 결정면이 (001)임이 확인되었다. 한편, Fig. 3(b)의 Fe-doped β -Ga₂O₃ 샘플에서는 (200), (400), (600), (800) 회절 peak가 관찰되어 모든 샘플의 주 결정면이 (100)면임을 확인하였다. 이를 통해 성장된 UID (001)면 및 Fe-doped (100)면 β -Ga₂O₃ 결정 모두 다이와 평행한 [010] 방향으로 안정하게 성장했음을 확인할 수 있다.

Figure 4는 β -Ga₂O₃ 단결정 잉곳 상부에서 추출한 샘플들의 X-ray rocking curve 분석(ω -scan)을 통한 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM) 값을 나타낸다. UID (001)면 β -Ga₂O₃ 샘플의 FWHM은 60 arcsec(Fig. 4(a))로 나타났으며, Fe 0.005 mol%, 0.01 mol% 및 0.02 mol% 샘플은 각각 66 arcsec(Fig. 4(b)), 79 arcsec(Fig. 4(c)) 및 90 arcsec(Fig. 4(d))로 각각 측정되었다. 모든 샘플에서 비교적 낮은 FWHM 값이 확인되어 우수한 결정 품질을 나타내었으나, Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 FWHM이 증가하는 경향을 보였다[9]. 이는 Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 결정 성장 중 격자 내 불순물 혼입 및 국부적인 격자 변형이 증가하여 결정

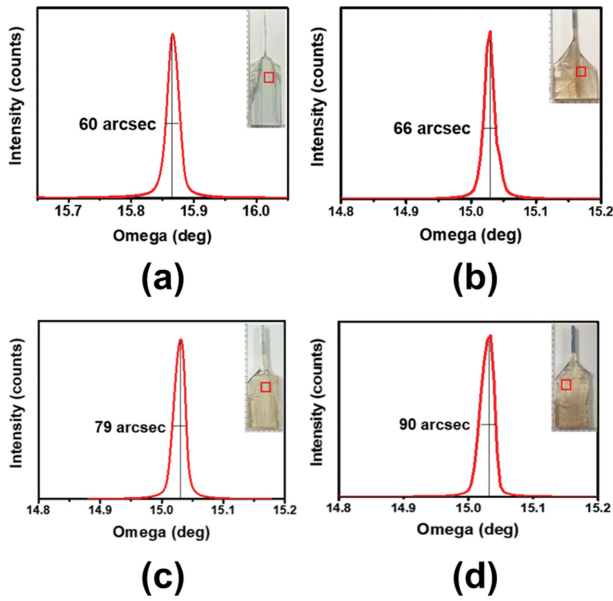


Fig. 4. XRD ω -scans of UID and Fe-doped β -Ga₂O₃ crystals. (a) UID, (b) Fe 0.005 mol%, (c) Fe 0.01 mol%, and (d) Fe 0.02 mol%. The full width at half maximum (FWHM) values are indicated in the figures.

품질이 저하된 것으로 이해할 수 있다. 한편, UID (001)면 및 Fe 0.01 mol%가 도핑된 (100)면 결정에서는 결정 솔더 부근으로부터의 다결정이 일부 혼입되었음에도 불구하고 전체적으로 우수한 결정 품질을 나타내었다.

Fe 도핑 농도에 따른 결정 내 결함 형상과 밀도를 확인하기 위해 Fe 0.005 mol%, 0.01 mol% 및 0.02 mol% β -Ga₂O₃ (100)면 샘플을 85 wt% H₃PO₄ 용액을 이용하여 140°C에서 2시간 동안 식각 후 광학현미경으로 표면을 관찰하였다. Figure 5는 Fe-doped (100)면 β -Ga₂O₃ 샘플 3종의 식각 후 표면에 형성된 etch pit을 광학현미경으로 관찰한 이미지를 나타낸다. 이미지 내 스케일바는 100 μ m이다. 모든 Fe-doped 샘플(Fig. 5(a)~(c))에서 [010] 방향으로 길게 연장된 타원형(Oval shape)의 etch pit이 관찰되었으며 대부분 100 μ m 이내의 길이를 나타내었다. Y. Liu 등에 따르면[10], 전위에서 기원한 결함은 [010] 방향으로 중심 부근에 약 45 μ m 크기와 약 1 μ m 깊이의 core가 존재하는 반면, 성장 중 발생하는 열

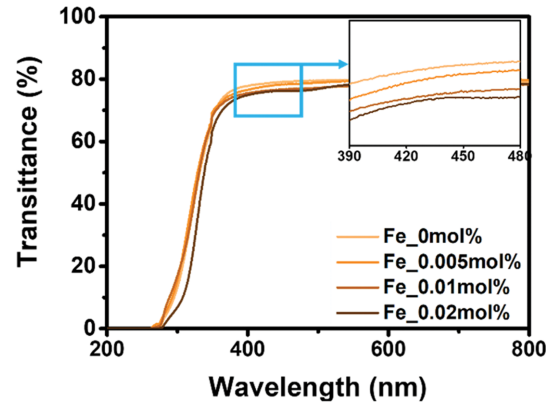


Fig. 6. Optical transmittance of UID (Fe 0 mol%) and Fe-doped β -Ga₂O₃ crystals.

응력 또는 가공 과정에서의 기계적 응력에 의해 유발된 결함은 [010] 방향으로 중심 부근에 core가 관찰되지 않으며 약 17 μ m의 크기를 갖는 것으로 보고되었다. 본 연구에서 관찰된 etch pit의 형상 및 크기를 비교한 결과, 해당 결함은 성장 또는 가공 과정에서 발생한 결함보다는 전위에 기원한 결함으로 판단된다.

한편, 각 도핑 샘플의 좌, 우, 상, 하 및 중앙의 총 5개 영역에서 etch pit의 평균 개수를 이용하여 EPD(etch pit density)를 산출하였다. Fe 0.005 mol% β -Ga₂O₃ 샘플의 EPD는 $9.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 미만으로 가장 낮게 나타났으며, Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 EPD가 증가하여 Fe 0.02 mol%와 0.01 mol% β -Ga₂O₃ 샘플에서 각각 $2.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 및 $1.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 로 높은값을 나타내었다. 이러한 EPD 증가는 앞서 XRD ω -scan의 FWHM 분석결과와 높은 상관 관계를 가진다. 즉, Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 결정 내 불순물 농도 증가 및 국부적인 격자 변형 발생에 따른 전위 등의 결정결함이 증가한 결과로 판단된다.

Figure 6에 UID (001)면 및 각 Fe 도핑 농도별 (100)면 β -Ga₂O₃ 샘플의 200~800 nm 파장 영역에서 측정된 투과 스펙트럼(Transmittance, %)을 나타내었다. UID (001)면 β -Ga₂O₃ 샘플은 가시광선 영역에서 약 80%에 근접한 높은 투과율을 나타내었다. 반면 Fe 도핑 농도가

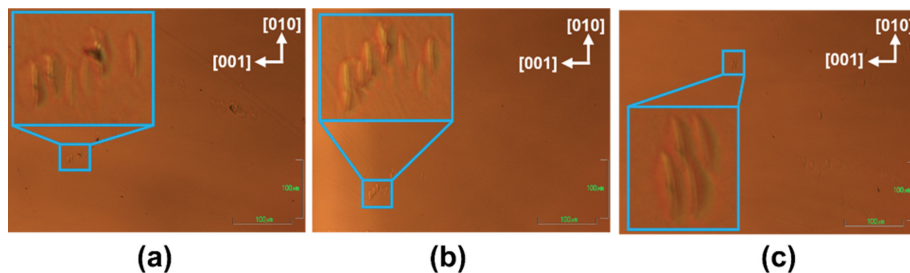


Fig. 5. Defect morphologies of Fe-doped samples: (a) Fe 0.005 mol%, (b) Fe 0.01 mol%, and (c) Fe 0.02 mol%. The scale bar indicates 100 μ m.

가장 높은 0.02 mol% (100)면 β -Ga₂O₃ 샘플에서 약 75 %의 상대적으로 낮은 투과율을 나타내었다. 모든 샘플이 동일하게 300 nm 이하의 영역에서는 기저 흡수단에 의한 흡수가 관찰되며, 350 nm 부근(β -Ga₂O₃ 샘플의 밴드 갭에너지보다 낮은 영역)에서의 광에너지증가에 따른 Band tail에 의한 흡수로 투과율이 감소하는 경향이 관찰된다. 한편, 400~700 nm의 가시광 영역(에너지 3.1~1.8 eV)에서는 β -Ga₂O₃ 샘플의 밴드갭에너지(~4.9 eV)보다 낮은 영역으로 전자를 여기시키지 못하고 그대로 투과하게 된다. Fe-doped (100)면 β -Ga₂O₃ 샘플들의 투과율은 Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 모든 샘플에서 260~300 nm 부근에 강한 흡수 영역이 공통으로 관찰되었다. 이러한 흡수 peak는 도핑 유무 또는 전도대의 전자 존재와 직접적인 관련이 없는 β -Ga₂O₃ 고유의 흡수 영역(Band-to-Band)으로 보고되고 있다[11].

Fe 도핑 농도에 따른 β -Ga₂O₃ 결정 내 Fe 도펀트 및 Si 불순물의 농도 분포를 확인하기 위해 SIMS 분석을 수행하였다. Table 1에 Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정의 상부, 중부 및 하부 영역에서 추출한 샘플을 대상으로 sputtering 깊이 600~1,000 nm 영역에서 측정한 depth profiling에 따른 Fe 및 Si 농도의 평균값을 나타내었다. 결정 내

Sn 불순물은 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 미만의 미량으로 검출되어 분석 결과에서 제외했다. UID (001)면 β -Ga₂O₃ 결정의 Si 농도는 $2.57 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 로 측정되었으며, Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정의 Fe 농도는 $2.08 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ~ $4.01 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, Si 농도는 $1.40 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ~ $5.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 범위로 측정되었다. 이는 Y. Ueda 등에 의해 보고된 Fe 0.02 mol% β -Ga₂O₃ 결정의 Fe 농도 $3.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ~ $1.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 와 Si 농도 $7.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ~ $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 와 비교하여 상대적으로 낮은 수준이다[12]. 이러한 차이는 본 연구에서 사용한 Ga₂O₃ 원료 분말(5 N 순도)에 포함된 Fe 및 Si 불순물의 함량이 상대적으로 낮았음을 알 수 있다. Fe 0.01 mol% β -Ga₂O₃ 샘플에서 Fe와 Si의 농도가 다른 도핑 농도의 샘플에 비해 상대적으로 높게 나타난 것은 사용된 원료 내 관련 불순물 함량이 높았다는 것을 보여준다. 한편, Fe 0.01 mol%와 0.02 mol% 샘플에서는 결정 내 측정 위치와 관계없이 Fe 도펀트 농도가 Si 불순물 농도보다 높게 나타난 것은 원료에 유입된 Si donor가 Fe 도펀트에 의해 상당부분 보상되었음을 시사한다. 결과적으로 Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정 내 높은 Fe 도펀트 농도 균일성을 보였다.

Figure 7은 Fe 도펀트의 응고 분율에 따른 농도 변화를 나타낸 결과이다. Fe의 분리계수는 Classical Scheil-

Table 1
Impurity concentrations in Fe-doped (100) plane β -Ga₂O₃ samples

Fe-doped Ga ₂ O ₃ samples	Measurement regions	Concentration (atoms/cm ³)	
		Fe	Si
Fe 0.005 mol%	Top	2.14E+16	2.29E+16
	Center	2.22E+16	1.40E+16
	Bottom	2.08E+16	2.40E+16
Fe 0.01 mol%	Top	2.09E+17	4.68E+16
	Center	2.80E+17	5.25E+16
	Bottom	4.01E+17	3.90E+16
Fe 0.02 mol%	Top	8.20E+16	1.43E+16
	Center	9.67E+16	2.21E+16
	Bottom	1.05E+17	1.46E+16

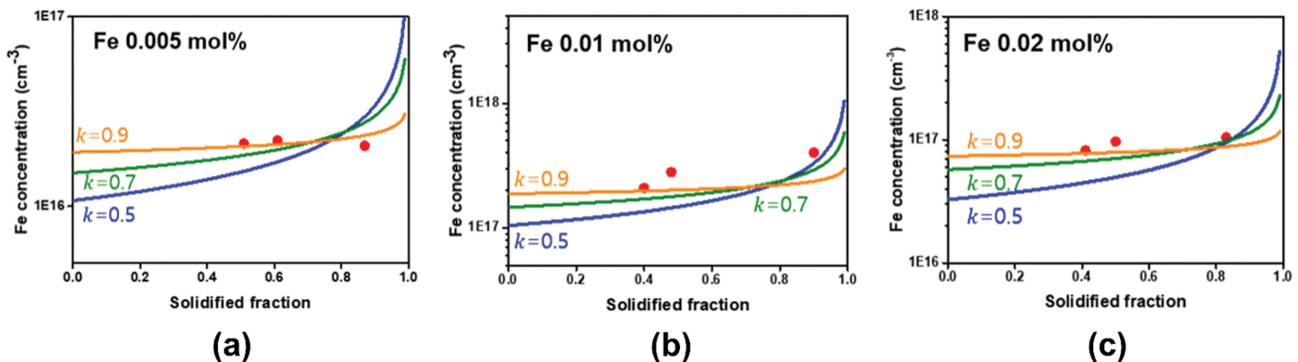


Fig. 7. Fe dopant concentration as a function of solidification fraction. The red circles represent segregation coefficient values for the upper, middle, and lower regions within the crystal.

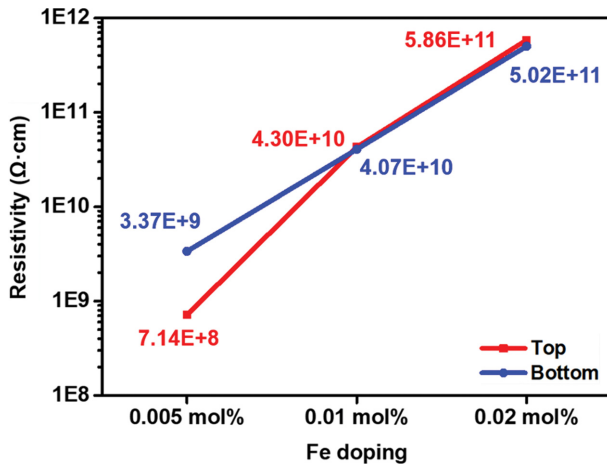


Fig. 8. Resistivity of β -Ga₂O₃ crystals as a function of Fe doping concentration (Top and bottom regions).

Gulliver equation을 이용하여 추정하였다[13-15].

$$Cs^* = C_0 k(1 - g)^{(k-1)} \quad (1)$$

여기서 Cs^* 는 고체-액체 계면에서의 결정 내 도펀트 농도, C_0 는 용융물 내 초기 도펀트 농도, k 는 분리계수, g 는 응고 분율을 의미한다. 이 식에는 고체상에서 Fe 확산이 발생하지 않고 용융물 내 Fe 농도가 균일하다는 조건을 가정한다. Figure 7(a)~(c)에 결정 내 상부, 중부 및 하부 영역에서의 분리계수 값을 빨간색 원으로 표시하였다. 계산 결과, 본 연구에서 성장된 Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정의 Fe 농도 변화가 $k = 0.7 \sim 0.9$ 범위에서 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이 값은 EFG 방법으로 성장된 Fe-doped LiNbO₃ 결정에서 보고된 Fe의 분리계수 $k = 0.94$ 와도 유사한 수준이다[16].

Figure 8은 Fe 도핑 농도에 따른 β -Ga₂O₃ 결정의 전기적 특성을 확인하기 위해 실온에서 비접촉식 비저항 측정기(COREMA-2000, Semilab Inc. Hungary)를 통해 얻은 비저항을 나타낸다. UID (001)면 β -Ga₂O₃ 결정의 비저항은 Hall-effect 분석을 통해 2.88 $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 측정되었다. 이를 기준으로 비저항 측정기를 통해 측정된 Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정들의 상부와 하부에서 측정된 비저항은 Fe 0.005 mol% 샘플에서 $7.14 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 과 $3.37 \times$

$10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타났으며, 0.01 mol% 샘플에서 $4.30 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 과 $4.07 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타났다. Fe 도핑 농도가 가장 높은 0.02 mol% β -Ga₂O₃ 샘플에서는 $5.86 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 과 $5.02 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 측정되었다. Fe 도핑 농도가 증가함에 따라 비저항이 증가하는 경향을 보였으며, 각 결정의 상부와 하부에서 측정된 비저항 값이 유사하게 나타나 β -Ga₂O₃ 결정 내 Fe 도핑이 비교적 균일하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fe 도핑 농도 증가에 따른 비저항 증가는 Fe에 의한 electron trap 밀도의 증가와 자유전자 농도의 감소에 기인하는 것으로 판단된다. Fe의 electron trap level은 전도대 하단으로부터 가전자대 방향으로 약 0.8 eV 상부에 위치하는 것으로 보고되어 있다[17,18]. Electron trap 밀도가 donor 밀도보다 충분히 높아지면 자유전자가 trap level에 포획되면서 페르미 준위(E_F)는 trap level (E_T) 부근에 고정되며($E_F \approx E_T$), 자유전자 농도(n)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = N_C \exp[-(E_C - E_T)/k_B T] \quad (2)$$

여기서 N_C 는 전도대의 유효 상태 밀도, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도를 의미한다. 비저항(ρ)은 다음 식으로 표현된다.

$$\rho = 1/qn\mu \quad (3)$$

여기서 μ 는 전자 이동도, q 는 기본 전하를 나타낸다. 따라서 Fe에 의해 형성된 E_T 의 위치에 따라 자유전자 농도가 감소하고 비저항이 증가하게 된다. Table 2에 각 샘플에서 측정된 비저항(ρ) 값을 기반으로 식(3)에 의해 계산된 캐리어 농도(n)를 나타내었다. 여기서 전자 이동도(μ)는 β -Ga₂O₃ 결정의 상온에서의 평균 전자 이동도 값인 100 cm^2/Vs 를 이용하였다[19].

Fe의 electron trap level이 약 0.8 eV에 위치하는 경우 이론적으로 약 $2 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항이 예상되며, 이는 Fig. 8에 나타난 Fe 0.02 mol% β -Ga₂O₃ 결정에서 측정된 높은 비저항과 유사한 수준임을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 Fe 0.02 mol% 정도의 도핑이 β -Ga₂O₃ 내 Si donor를 효과적으로 보상하여 높은

Table 2

Electron carrier concentrations (n) calculated using Eq. (3) based on the measured resistivity (ρ) values for Fe-doped (100) plane β -Ga₂O₃ samples

Fe-doped Ga ₂ O ₃ samples	Measurement region	Resistivity, ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Carrier concentration, n (cm^{-3})
Fe 0.005 mol%	Top	7.14E+8	8.74E+7
	Bottom	3.37E+9	1.85E+7
Fe 0.01 mol%	Top	4.30E+10	1.45E+6
	Bottom	4.07E+10	1.53E+6
Fe 0.02 mol%	Top	5.86E+11	1.06E+5
	Bottom	5.02E+11	1.24E+5

비저항을 갖는 반절연성 결정을 구현하는 데 효과적임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 β -Ga₂O₃ 기반 가로형 전력 소자의 고 전력화를 위한 Fe-doped 반절연 β -Ga₂O₃ 기판의 성장과 분석을 통한 최적의 Fe 도핑 농도를 탐색하였다. EFG법을 이용하여 UID 및 Fe 몰분율을 달리하여 성장시킨 Fe-doped β -Ga₂O₃ 단결정의 면 방향, 결정 품질, 결함 형상, 결함 밀도, 광학적 특성 및 전기적 특성 변화를 체계적으로 분석하였다. Fe 도핑 농도가 0 mol%, 0.005 mol%, 0.01 mol% 및 0.02 mol%로 증가함에 따라 결함밀도가 증가하여 결정 품질과 광학적 투과율이 저하되었다. SIMS 분석 결과, Fe-doped β -Ga₂O₃ 결정(Fe 0.01 mol% 및 0.02 mol% 샘플)에서는 Fe 도펀트 농도가 Si 불순물 농도보다 높게 나타나 Si donor가 Fe 도펀트에 의해 충분히 보상되었음을 확인하였다. 이는 Fe 도핑 농도 증가에 따른 전자 trap 형성 및 자유전자 농도 감소로 인한 비저항 증가를 시사한다. 결과적으로 Fe 0.02 mol% 결정이 약 $5 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 수준의 높은 비저항을 갖는 반절연 β -Ga₂O₃ 기판 제작을 위한 적정 도핑 조건임을 확인하였다. 향후 (010)면, (-201)면, (011)면 등 벽개(Cleavage) 특성에 의해 유발되는 결정 쪼개짐과 쌍정(twin) 발생을 최소화하고, 우수한 에피층 품질을 확보할 수 있는 반절연 대면적 기판 성장 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Republic of Korea, through the Materials and Components Technology Development (R&D) Program (Project No. RS-2026-25544169), and by Korea Basic Science Institute (Natioanl research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (grantNo. RS-2025-02317773).

References

- [1] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Gallium oxide (Ga₂O₃) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β -Ga₂O₃ (010) substrate", Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 013504.
- [2] E. Ahmadi and Y. Oshima, "Materials issues and devices of α - and β -Ga₂O₃", J. Appl. Phys. 126 (2019) 160901.
- [3] K.D. Chabak, K.D. Leedy, A.J. Green, S. Mou, A.T. Neal, T. Asel, E.R. Heller, N.S. Hendricks, K. Liddy, A. Crespo, N.C. Miller, M.T. Lindquist, N.A. Moser, R.C. Fitch Jr, D.E. Walker Jr, D.L. Dorsey and G.H. Jessen, "Lateral β -Ga₂O₃ field effect transistors", Semicond. Sci. Technol. 35 (2020) 013002.
- [4] Novel crystal technology, Inc. "Successful development of a crystal growth method that significantly reduces the amount of precious metals used", <https://www.novel-crystal.co.jp/eng/2025/2840/>, 20260803
- [5] A. Bhattacharyya, S. Roy, P. Ranga, D. Shoemaker, Y. Song, J.S. Lundh, S.W. Choi and S. Krishnamoorthy, "130 mA/mm β -Ga₂O₃ metal semiconductors field effect transistor with low-temperature metalorganic vapor phase epitaxy-regrown ohmic contacts", Appl. Phys. Express 14 (2021) 076502.
- [6] A. Bhattacharyya, S. Sharma, F. Alema, P. Ranga, S. Roy, C. Peterson, G. Seryogin, A. Osinsky, U. Singiseti and S. Krishnamoorthy, "4.4 kV β -Ga₂O₃ MES-FETs with power figure of merit exceeding 100 MW cm⁻²", Appl. Phys. Express 15 (2022) 061001.
- [7] Z. Xia, H. Xue, C. Joishi, J. McGlone, N.K. Kalarickal, S.H. Sohel, M. Brenner, A. Arehart, S. Ringel, S. Lodha, W. Lu and S. Rajan, " β -Ga₂O₃ delta-doped field-effect transistors with current gain cutoff frequency of 27 GHz", IEEE Electron Device Lett. 40 (2019) 1052.
- [8] H.J. von Bardeleben, X. Zhou, J. Zhou, G. Xu, S. Long and U. Gerstmann, "High-temperature annealing induced electrical compensation in UID and Sn doped β -Ga₂O₃ bulk samples: The role of V_{Ga}-Sn complexes", J. Appl. Phys. 137 (2025) 055703.
- [9] W. Xu, Y. Chen, X. Zhou, X. Xu, X. Dong, H. Long, Z. Fang, Z. Yang, D. Chen, H. Qi and K. H. L. Zhang, "Recent advancement and perspective of epitaxial growth and doping of β -Ga₂O₃ thin films for power electronics", Appl. Phys. Lett. 13 (2025) 100601.
- [10] Y. Liu, Z. Jin, L. Li, N. Xia, H. Zhuang and D. Yang, "Two types of etching pits in (100) β -Ga₂O₃ single crystals grown by casting method", MicroNanostructures 176 (2023) 207541.
- [11] A. Singh, O. Koksai, N. Tanen, J. McCandless, D. Jena, H.G. Xing, H. Peelaers and F. Rana, "Intra- and inter-conduction band optical absorption processes in β -Ga₂O₃", Appl. Phys. Lett. 117 (2020) 072103.
- [12] Y. Ueda, T. Igarashi, K. Koshi, S. Yamakoshi, K. Sasaki and A. Kuramata, "Two-inch Fe-doped β -Ga₂O₃ (010) substrates prepared using vertical Bridgman method", Jpn. J. Appl. Phys. 62 (2023) SF1006.
- [13] Z. Galazka, "Growth of bulk β -Ga₂O₃ (010) single crystals by the Czochralski method", J. Appl. Phys. 131 (2022) 031103.
- [14] G.H. Gulliver, "The quantitative effect of rapid cooling upon the constitution of binary alloys", J. Inst. Metals 9 (1915) 120.
- [15] E. Scheil, "Bemerkungen zur schichtkristallbildung", Z. Metallkd. 34 (1942) 70.
- [16] K. Kawasaki, Y. Okano, S. Kan, M. Sakamoto, K.

- Hoshikawa and T. Fukuda, "Uniformity of Fe-doped LiNbO₃ single crystal grown by the Czochralski method", J. Cryst. Growth 119 (1992) 317.
- [17] M.E. Ingebrigtsen, J.B. Varley, A.Y. Kuznetsov, B.G. Svensson, G. Alfieri, A. Mihaila, U. Badstubner and L. Vines, "Iron and intrinsic deep level states in Ga₂O₃", Appl. Phys. Lett. 112 (2018) 042104.
- [18] E. Farzana, M.F. Chaiken, T.E. Blue, A.R. Arehart and S.A. Ringel, "Impact of deep level defects induced by high energy neutron radiation in β -Ga₂O₃", APL Mater. 7 (2019) 022502.
- [19] K. Irmscher, Z. Galazka, M. Pietsch, R. Uecker and R. Fornari, "Electrical properties of β -Ga₂O₃ single crystals grown by the Czochralski method", J. Appl. Phys. 110 (2011) 063720.