

Characteristics of Sn-doped β -Ga₂O₃ single crystals grown by EFG method

Tae-Wan Je, Su-Bin Park, Hui-Yeon Jang, Su-Min Choi, Mi-Seon Park, Yeon-Suk Jang, Won-Jae Lee[†], Yun-Gon Moon*, Jin-Ki Kang*, Yun-Ji Shin** and Si-Yong Bae**

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 March 13, 2023)

(Revised March 20, 2023)

(Accepted March 22, 2023)

Abstract The β -Ga₂O₃ has the most thermodynamically stable phase, a wide band gap of 4.8~4.9 eV and a high dielectric breakdown voltage of 8MV/cm. Due to such excellent electrical characteristics, this material as a power device material has been attracted much attention. Furthermore, the β -Ga₂O₃ has easy liquid phase growth method unlike materials such as SiC and GaN. However, since the grown pure β -Ga₂O₃ single crystal requires the intentionally controlled doping due to a low conductivity to be applied to a power device, the research on doping in β -Ga₂O₃ single crystal is definitely important. In this study, various source powders of un-doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol%, Sn 3 mol%-doped Ga₂O₃ were prepared by adding different mole ratios of SnO₂ powder to Ga₂O₃ powder, and β -Ga₂O₃ single crystals were grown by using an edge-defined Film-fed Growth (EFG) method. The crystal direction, crystal quality, optical, and electrical properties of the grown β -Ga₂O₃ single crystal were analyzed according to the Sn dopant content, and the property variation of β -Ga₂O₃ single crystal according to the Sn doping were extensively investigated.

Key words Gallium oxide, β -Ga₂O₃, EFG method, Single crystal growth, Sn, Doping

EFG 법으로 성장한 β -Ga₂O₃ 단결정의 Sn 도핑 특성 연구

제태완, 박수빈, 장희연, 최수민, 박미선, 장연숙, 이원재[†], 문윤곤*, 강진기*, 신윤지**, 배시영**

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

*Axel, 진주, 52818

**한국세라믹기술원, 진주, 52851

(2023년 3월 13일 접수)

(2023년 3월 20일 심사완료)

(2023년 3월 22일 게재확정)

요약 최근 전력반도체 소재로 관심을 가지는 Ga₂O₃의 β -상은 열역학적으로 가장 안정한 상을 가지며 4.8~4.9 eV의 넓은 밴드갭과 8 MV/cm의 높은 절연과피전압을 갖는다. 이러한 우수한 물리적 특성으로 인해 전력반도체 소재로 많은 주목을 받고 있다. β -Ga₂O₃는 SiC 및 GaN의 소재와는 다르게 액상이 존재하기 때문에 액상 성장법으로 단결정 성장이 가능하다. 하지만 성장한 순수 β -Ga₂O₃ 단결정은 전력 소자에 적용하기에는 낮은 전도성으로 인해 의도적으로 제어된 도핑 기술이 필요하며 도핑 특성에 관한 연구가 매우 중요하다. 이 연구에서는 Ga₂O₃ 분말과 SnO₂ 분말의 몰 비율을 다르게 첨가하여 Un-doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol%, Sn 3 mol%의 혼합분말을 제조하여 EFG(Edge-defined Film-fed Growth) 방법으로 β -Ga₂O₃ 단결정을 성장시켰다. 성장된 β -Ga₂O₃ 단결정의 Sn dopant 함량에 따른 결정 품질 및 광학적, 전기적 특성 변화를 분석하였으며 Sn 도핑에 따른 특성 변화를 광범위하게 연구하였다.

1. 서론

전력반도체는 가전기구나 자동차의 인버터, 정보 설비 등 다양한 시스템에서 요구하는 전류와 전압으로 적합하

게 변환시키기 위해 전력을 공급, 제어, 변환하는 반도체 소자이다. 기존에는 Si 기반의 전력반도체를 주로 사용하였으나 소자의 특성이 이론적 한계치에 다다르면서, Si의 한계를 뛰어넘는 SiC, GaN, Ga₂O₃와 같은 소재가 주목받고 있으며, 일본과 중국, 유럽 등에서 활발하게 연구 개발이 진행되고 있다[1,2]. 그중에서 단사정계 구조

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

를 가지는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 SiC 및 3족 질화물 GaN에 비해 4.8~4.9 eV의 큰 밴드갭 에너지를 가지기 때문에, 초광대역 갭 반도체로서 큰 주목을 받고 있다. 또한 가시광선부터 깊은 자외선 범위에 이르는 높은 투명성 때문에, Ga_2O_3 는 자외선 광검출기 제작에 적용이 되고 있다. 특히 8 MV/cm의 높은 절연과괴전압을 갖는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 전계효과 트랜지스터, 쇼트키 다이오드 및 기타 전력 전자소자에서 큰 응용 가능성을 나타낸다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 SiC, GaN 등 기존의 광대역 갭 반도체에서는 불가능한 액상 성장법의 단결정 기판 제작이 가능하여 제조에 필요한 에너지나 비용을 대폭으로 줄일 수 있다. 여러 가지 액상 성장법 중에서 EFG 법은 다른 액상 성장법과 비교했을 때 상대적으로 높은 성장 속도와 대구경화가 가능하며 Ir 도가니 내의 slit 상단 형상에 의해 결정 형상을 제어할 수 있다. EFG 법으로 성장된 순수한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 의 특성은 위에 언급한 장치들의 전기적 특성을 충족할 수 없다. 그러므로 원하는 비저항 값과 전기전도도를 얻기 위해서는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정에 Si, Ge, Sn, Ti 등 dopant를 첨가하여야 하며, 첨가하는 dopant의 농도를 제어함으로써 비저항 및 캐리어 농도를 바꾸는 것이 가능하다 [3-8].

본 연구에서는 dopant 원소로 Sn을 사용했으며, Sn이 도핑된 n-type 단결정을 제조하기 위해 Ga_2O_3 분말과 SnO_2 분말의 몰 질량비를 다르게 첨가하여 여러 개의 혼합분말을 제조하였다. EFG법을 이용하여 주 평면 (001), 성장 방향은 [010]으로 하여 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정을 성장시켰다. Sn 도핑 농도에 따라 성장한 잉곳 결정면의 결정 품질과 광학적, 전기적 특성 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

EFG 법으로 Sn이 도핑된 (001) 결정면을 가지는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 잉곳을 성장시키기 위해 우선 (001) 결정면의 bulk $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정에서 seed 홀더의 크기에 맞게 seed를 추출하였다. 실험에 사용한 분말은 Sn 도핑 농도에 따른 특성 변화를 분석하기 위해 un-doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol%, Sn 3 mol%의 혼합분말을 제조하였다. Sn의 경우 EFG 단결정 성장의 가열단계에서 Ga_2O_3 보다 휘발성이 강하기 때문에 먼저 휘발되는 특성이 있으며, 이를 최대한 억제하고자 하였다. 우선 파우더가 균일하게 섞일 수 있도록 원통 모양의 회전 용기에 혼합분말을 넣은 후 100 RPM의 빠른 속도로 회전시켜 12시간 정도 볼 밀 공정을 진행하였다. 그 후, 100 ϕ 지름의 원통형 몰드에 혼합분말을 넣은 후 5 MPa의 프레스 압력으로 1분간 압착하였고, 뒤집어 재압착 후 제조하였다. 성형된 혼합분말은 산소 대기압 분

위에서 1,500°C 10시간 소결을 진행하였다[9]. 소결된 혼합분말을 다시 분쇄하여 Ir 도가니에 130 g 장입한 후 실험을 진행하였다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정 성장은 우선 챔버 내부에 존재하는 잔류 불순물과 오염물질을 제거하기 위해 10^{-5} MPa의 저진공 상태를 만든 후, 50 % CO_2 + 50 % Ar 조성비의 혼합대기 가스를 0.11 MPa까지 주입하였다. RF 유도가열을 통해 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 녹는점까지 heating을 진행하였고, 슬릿 위에 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 결정 조각을 배치하여 녹는점을 확인하였다. 용융된 파우더는 모세관 현상에 의해 두 개의 다이 튜브 사이(슬릿)로 인상이 되며 인상된 용융물에 seed 결정을 접촉시켜 단결정 성장을 진행하였다[10]. 이후 성장 공정은 크게 seeding - necking - shouldering - body growth - cooling 공정 순서대로 진행했으며, seeding 공정과 necking 공정에서 시간을 많이 지체하게 되면 성장 중에 생성된 휘발 물질들이 seed 표면에 달라붙어 성장하는 bulk 결정 품질에 영향을 미치게 되어[11], 본 실험에서는 necking 공정을 생략하였으며, Sn 도핑 농도에 따른 성장 특성 변화를 보기 위해 인상 속도, 하강 속도, 혼합대기 조성비, 성장 압력, 분말 장입량 등의 성장변수를 동일하게 하여 단결정을 성장시켰다. 성장된 각각의 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 잉곳의 body 부분에서 균열 및 벽면이 없는 영역으로 약 7 mm \times 7 mm \times 1 mm(높이 \times 너비 \times 두께) 크기의 샘플을 추출하였다. 각각의 샘플은 XRD theta-2theta scan으로 성장 잉곳의 결정면을 확인하였으며, 결정의 품질은 Rocking curve로 측정하였다. 특성 변화를 분석하기 위해 UV-VIS-NIR Spectrophotometer(CARY 5, Varian, Australia)분광기를 이용하여 투과도 및 흡광도를 측정하였고, 투과도 그래프를 이용하여 밴드갭 변화 특성을 확인하였다. 전기적 특성은 Hall Effect Measurement System을 이용하여 Sn 도핑 농도에 따른 다수 캐리어타입, 캐리어농도, 비저항, 이동도 등의 전기적 특성 변화를 분석하였으며, SnO_2 분말의 몰 질량비에 따라 성장한 잉곳의 Sn 도핑 농도 및 불순물 농도를 한국기초과학지원연구원(KBSI)의 IMS-6f Magnetic Sector SIMS(CAMECA 사) 분석장비를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1은 Sn 도핑 농도를 다르게 하여 EFG 법으로 성장한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 단결정 잉곳 사진을 나타내고 있다. Sn 도핑 농도가 증가함에 따라 성장된 잉곳의 색깔이 무색에서 파란색으로 진해지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 Sn 도핑 농도가 증가할수록 잉곳에서 쌍정과 내부 균열과 같은 결함이 증가하는 경향을 나타냈으며 취성이 높은 벽면을 따라 잉곳이 분리되는 특성을 보였다. Sn 3

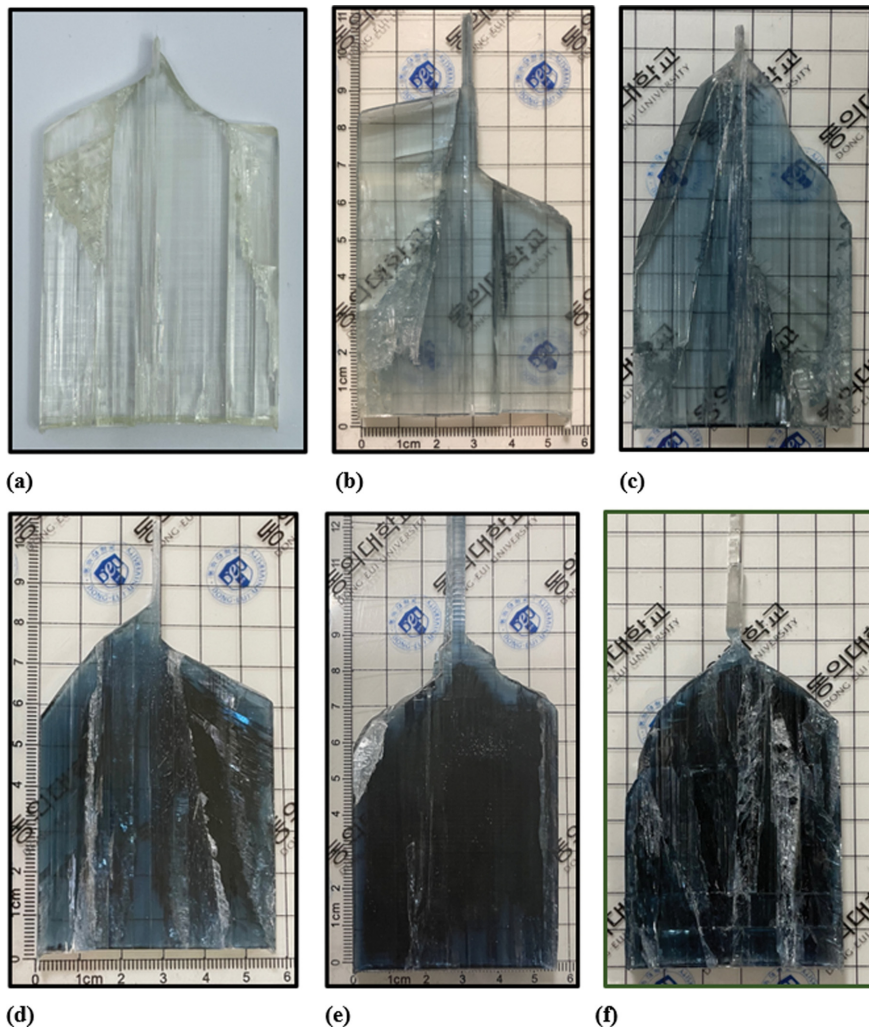


Fig. 1. Photographs of β -Ga₂O₃ single crystal ribbons grown with Sn doping concentration; (a) Un-doped, (b) Sn 0.05 mol%, (c) Sn 0.1 mol%, (d) Sn 1.5 mol%, (e) Sn 2 mol%, (f) Sn 3 mol%.

mol% 시편의 경우 성장 잉곳의 낮은 품질로 인해 샘플 추출 과정에서 표면 스크래치와 내부 균열 등 분석이 불가능하여 이 샘플을 제외한 나머지 샘플들을 분석 진행하였다. 우선 성장된 β -Ga₂O₃ 단결정 잉곳의 결정면과 결정 품질을 확인하기 위해 XRD 분석을 진행하였다. Scan 범위는 2theta 10~80°까지 측정하였으며 Fig. 2에는 un-doped, Sn 0.1 mol%, Sn 2 mol% 첨가하여 성장한 잉곳의 XRD 패턴을 나타내고 있다. XRD 분석을 통해 (001), (002), (003), (004)의 회절 각도에 해당하는 peak가 검출되었고 이는 (001) 주면을 가지는 seed와 동일한 결정면으로 β -Ga₂O₃(001) 단결정 잉곳이 성장된 것을 의미한다. 추가적으로 seed와 동일한 결정면으로 성장한 잉곳의 Sn 도핑 농도에 따라 결정 품질에 미치는 영향을 분석하기 위해 Rocking curve 분석을 진행하였다. Figure 3에 측정된 FWHM 값이 un-doped 샘플의 경우 208 arcsec로 측정되었고 Sn 0.1 mol%, Sn 2 mol%의 측정값은 각각 576 arcsec, 132 arcsec로 측정되었다.

Figure 1에서는 육안상으로 봤을 때, Sn 도핑 함량이 증가할수록 잉곳의 결정 품질이 전반적으로 낮은 것을 확인할 수 있지만 Sn 2 mol%의 경우 FWHM 값이 132 arcsec로 결정 품질이 우수한 것을 볼 수 있다. 이는 Sn 도핑에 의한 영향으로 결정 품질이 떨어지는 하지만, EFG 법으로 단결정 성장을 진행할 때 주면을 (001)면으로 하는 실험의 EFG 성장 공정 제어가 최적화가 되지 않은 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

Figure 4는 Sn 도핑 농도에 따른 광학적 특성 변화를 확인하기 위해 각 샘플을 200~800 nm 범위에서 분석한 투과 스펙트럼을 나타내고 있다. Un-doped 샘플의 경우 가시광선 영역에서 약 80%의 높은 투과율을 나타내고 있으며 Sn 도핑 농도가 증가할수록 투과율이 감소하는 특징을 보였다. 모든 샘플은 260~275 nm 파장 범위에서 광학적 흡수가 되는 것을 볼 수 있으며, Sn 도핑 샘플의 경우 Sn 도핑에 따른 불순물 흡수 준위가 관찰되며 약 350 nm 파장영역에서 약간의 흡수 peak를 볼 수 있다

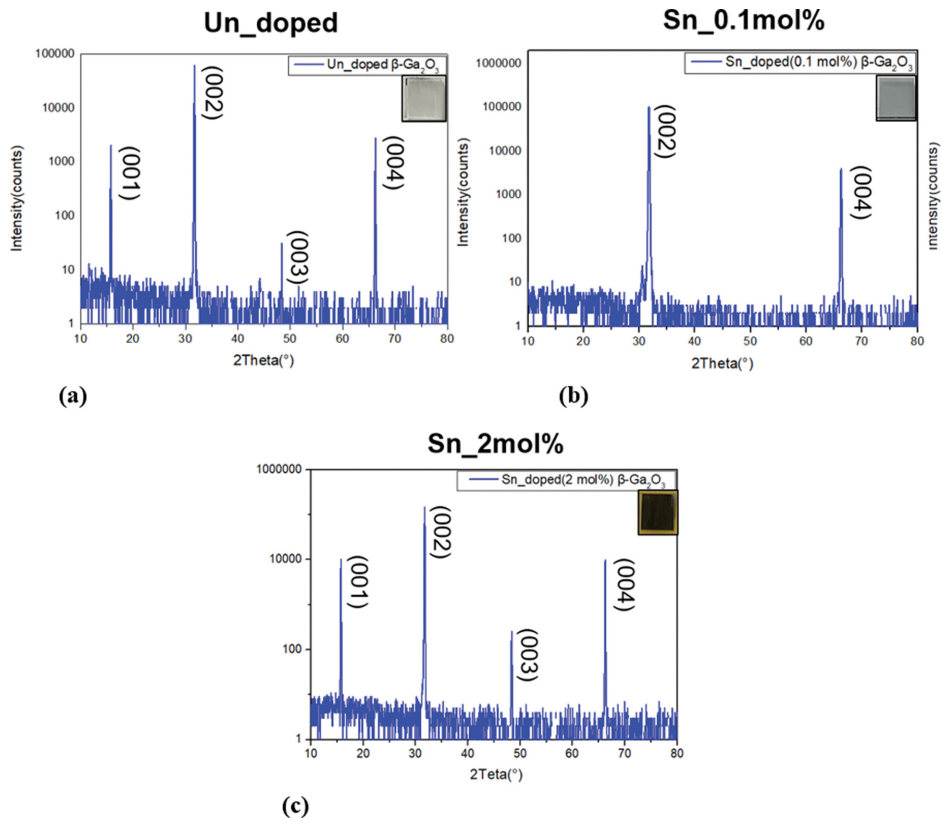


Fig. 2. Theta-2Theta scan of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal ribbons with different Sn concentration, (a) Un-doped, (b) Sn_0.1 mol% (c) Sn_2 mol%.

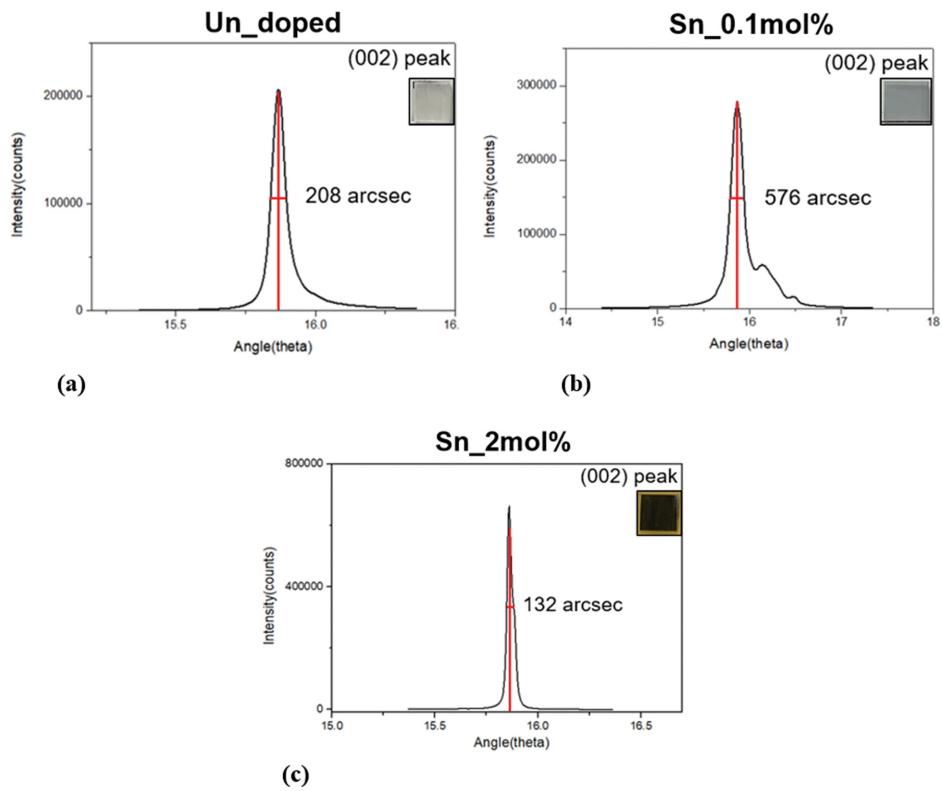


Fig. 3. Rocking Curve of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal ribbons with different Sn concentration, (a) Un-doped, (b) Sn_0.1 mol% (c) Sn_2 mol%.

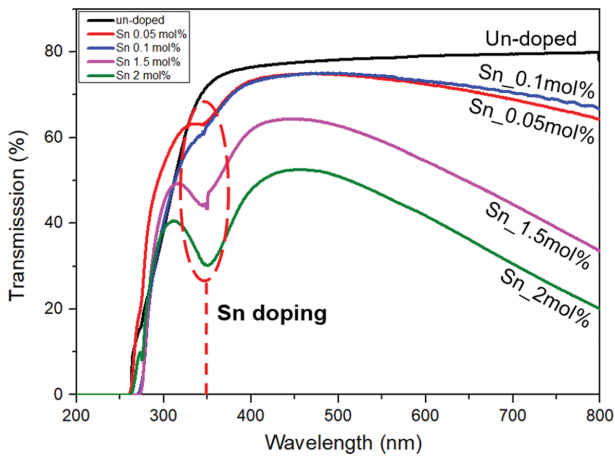


Fig. 4. UV/VIS/NIR transmission characteristics of β -Ga₂O₃ single crystal ribbons with different Sn concentration.

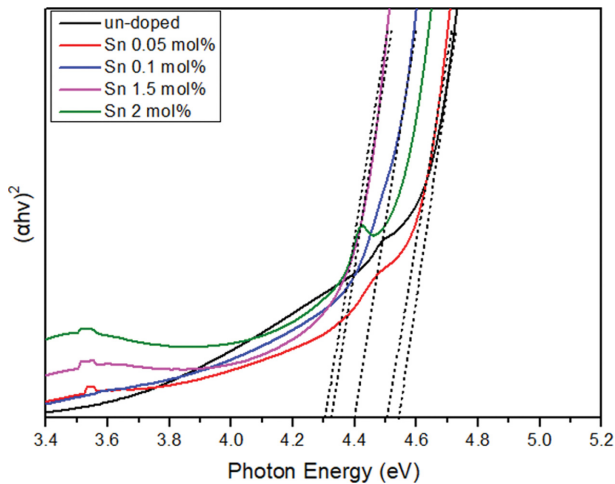


Fig. 5. Band gap energy of β -Ga₂O₃ single crystal ribbons with different Sn concentration.

[12]. 추가로 Sn 도핑 농도에 따른 β -Ga₂O₃ 단결정의 밴드갭 변화 특성을 알아보기 위해 아래의 Tauc plot 수식을 이용하여 계산하였다.

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

수식(1)에서 α 는 흡수 계수, $h\nu$ 는 입사광 에너지, A는

비례 상수, E_g 는 밴드갭 에너지를 나타낸다. Figure 5는 Tauc plot 수식을 통해 자외선-가시광선 분광 투과도 그래프로부터 전환된 Tauc plot 그래프를 나타내며 x축은 Photon energy(eV), y축은 $(\alpha h\nu)^2$ 나타낸다. 밴드갭 에너지는 그래프의 급격한 상승곡선을 접점으로 x축에 직선을 그어 추산되었다. Un_doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol% 샘플의 밴드갭 에너지는 각각 4.54 eV, 4.50 eV, 4.40 eV, 4.32 eV, 4.30 eV로 확인되었다. 이는 Sn 도핑 농도가 증가할수록 밴드갭 에너지가 감소하는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 SIMS 분석의 결과로 각 잉곳에서 추출한 샘플과 상용화 웨이퍼 샘플의 Sputter 깊이에 따른 불순물 농도를 나타내며 Si, Fe, Sn의 불순물 농도를 나타내고 있다. Ga₂O₃의 주요 dopant 불순물인 Si, Fe, Sn 원소의 경우 표준 샘플이 있으므로 정량적인 수치를 알 수 있으며, Table 1에 sputter 깊이(200~500 nm)에서의 dopant 원소의 농도 평균값을 나타내었다. Sn dopant 첨가 함량이 증가할수록 성장된 잉곳에서의 Sn 도핑 농도 또한 증가하는 경향을 보였다. Sn 0.05 mol%와 Sn 0.1 mol%의 경우 Sn 0.05 mol% 샘플의 Sn 도핑 농도 값이 높은 것을 볼 수 있는데 이는 SnO₂의 높은 증기압으로 인해 휘발도가 커서 성장된 잉곳의 위치별로 도핑 농도가 균일하지 못한 이유로 판단된다. Sn_doped(1.5 mol%) β -Ga₂O₃ 샘플의 Sn 도핑 농도 값은 2.95×10^{18} atom/cm³이며 상용화 웨이퍼의 Sn 도핑 농도 값은 2.05×10^{18} atom/cm³으로 비슷한 측정값을 나타낸다. Sn_doped(2 mol%) 샘플의 경우 Sn 도핑 농도 값은 1.17×10^{19} atom/cm³으로 상용화 웨이퍼의 Sn 도핑 농도 값보다 높은 수치 값을 나타낸다. Un-doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol%의 샘플에서 불순물인 Si와 Fe의 농도는 상용화 웨이퍼와 비교했을 때 현저히 높은 값을 나타내고 있다. 이는 Ga₂O₃ 분말 내의 불순물인 Si와 Fe 원소가 비교적 많이 포함된 영향으로 정확한 도핑 농도를 조절하기 위해서는 고순도의 파우더가 필요하다는 것을 의미한다. SIMS 분석값을 토대로 Sn dopant 함량은 1~2 mol% 사이의 도핑 함량이 적정할 것으로 생각된다.

Table 1
Concentration for some elements of β -Ga₂O₃ single crystal ribbons grown with different Sn concentration by SIMS analysis

Sample	Concentration (atom/cm ³) [Average 200~500 nm Depth]		
	Sn	Si	Fe
Un-doped	2.57E16	1.06E18	1.07E18
Sn 0.05 mol%	9.95E17	1.96E18	2.87E18
Sn 0.1 mol%	7.06E17	8.35E17	2.87E17
Sn 1.5 mol%	2.95E18	1.58E18	1.29E18
Sn 2 mol%	1.17E19	5.47E17	1.17E17
Commercial Sn-doped wafer	2.05E18	5.26E17	7.16E16

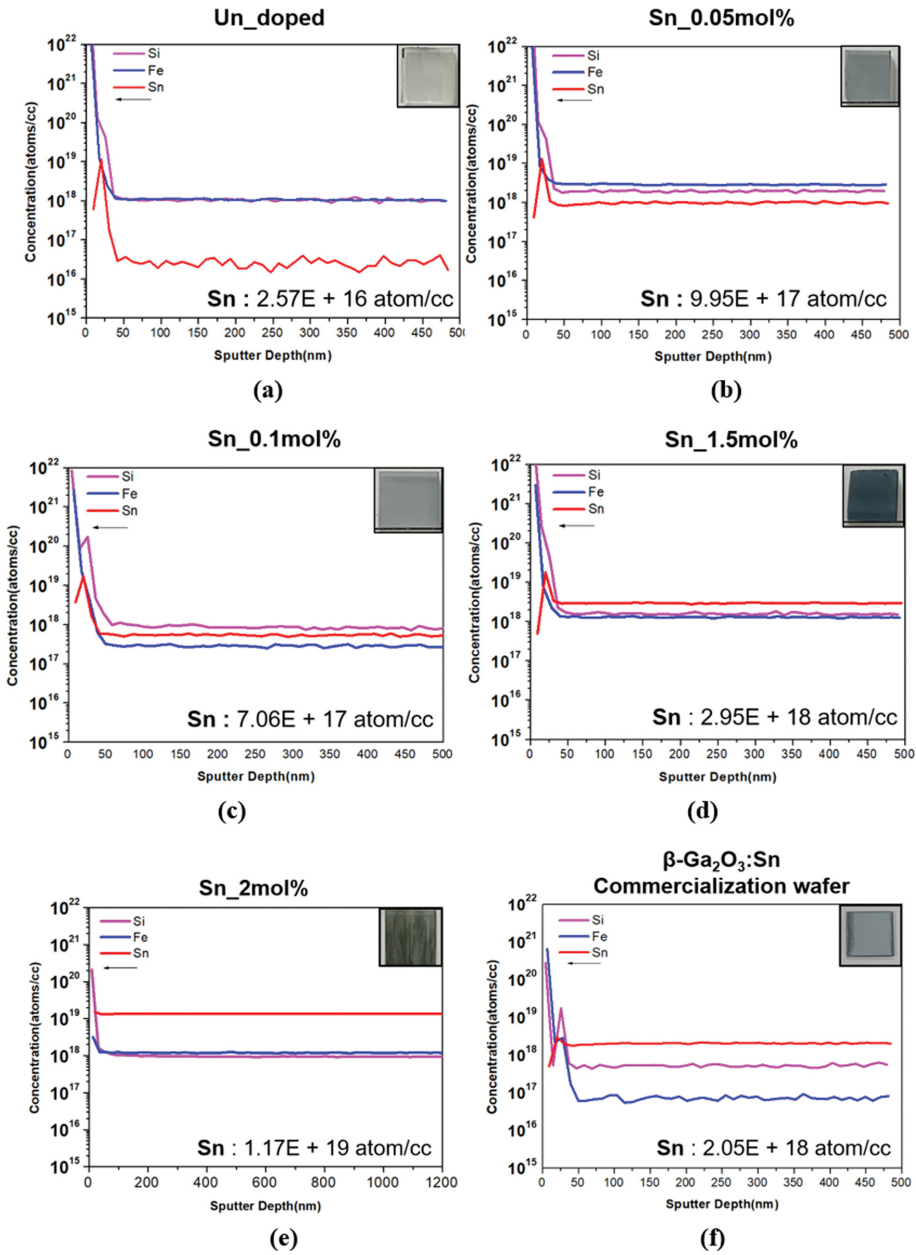


Fig. 6. Sn doping and impurities concentration in Un/Sn-doped β -Ga₂O₃ crystal ribbons by SIMS analysis; (a) Un-doped, (b) Sn_0.05 mol%, (c) Sn_0.1 mol%, (d) Sn_1.5 mol%, (e) Sn_2 mol%, (f) Commercial Sn-doped β -Ga₂O₃ (001) wafer.

Table 2
Electrical properties from Hall-Effect measurement of β -Ga₂O₃ single crystal ribbons grown with different Sn concentration

Sample	Carrier type	Carrier density n [cm ⁻³]	Resistivity ρ [Ω ·cm]	Mobility μ [cm ² /V·s]
Un-doped	N	1.44×10^{16}	2.88	150.5
Sn 0.05 mol%	N	1.57×10^{18}	0.027	116.7
Sn 0.1 mol%	N	1.84×10^{18}	0.021	101.1
Sn 1.5 mol%	N	8.10×10^{18}	0.011	73.3
Sn 2 mol%	N	1.49×10^{19}	0.0086	49.7

또한 Sn 도핑 농도에 따른 전기적 특성 변화를 확인 하기 위해 각각의 샘플 가장자리에 전자빔 진공증착기를

이용하여 20/200 nm 두께로 Ti/Au를 증착하였고 470°C 온도에서 1분간 열처리 진행을 하여 오믹 접합을 형성

한 후, Hall-Effect 분석을 진행하였다. Table 2에 각 샘플의 다수 캐리어 타입, 캐리어 농도, 비저항, 이동도 순서로 나타내었다. 측정 결과를 보면 Un/Sn-doped β -Ga₂O₃ 단결정 샘플 모두 캐리어 타입은 N-type을 나타냈으며 이는 전기전도도에 미치는 주요 캐리어가 전자임을 나타낸다. Un-doped 샘플의 경우 산소 공공에 의해 생성된 전자는 donor 역할을 하기 때문에 n형 반도체를 나타낸다[13]. SIMS 분석에서의 Sn 농도와 Hall-effect에서의 전하의 농도는 약간 상이하게 나타내는데 이는 Ga₂O₃ 분말 내의 dopant 역할을 하는 Si와 Fe 불순물의 영향으로 판단된다. Sn 도핑된 샘플들은 Sn 도핑 농도가 증가할수록 캐리어 농도가 증가하며 반대로 비저항과 이동도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Sn이 n형 dopant로서 의도적인 도핑에 의해 저항과 캐리어 농도가 조절될 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 EFG법을 이용하여 β -Ga₂O₃(001) 단결정을 성장시켰으며 n형 dopant인 Sn의 도핑 농도를 un-doped, Sn 0.05 mol%, Sn 0.1 mol%, Sn 1.5 mol%, Sn 2 mol%, Sn 3 mol%로 몰 질량비를 다르게 하여 Sn이 도핑된 잉곳의 특성 변화를 분석하였다. 성장된 잉곳의 광학적 이미지에서는 Sn 도핑 농도가 증가할수록 쌍정 및 벽개면과 같은 결함이 다소 증가하는 경향성을 보였으나, (001)면으로 성장된 잉곳의 FWHM 값은 각각 208 arcsec, 576 arcsec, 132 arcsec로 도핑에 의한 결정 품질 저하보다는 EFG 법 성장 제어의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. Sn 도핑 농도에 따른 광학적 특성으로 UV/VIS/NIR 분광기로 확인한 결과, Un-doped 샘플의 경우 가시광선 영역에서 약 80%의 높은 투과율을 보였으며 Sn 도핑 농도가 증가할수록 투과율 감소 특징을 보였다. 성장된 잉곳 모두 260~275 nm 파장 영역에서 광학적 흡수가 일어났으며, Sn이 도핑된 샘플의 경우 약 350 nm 파장 영역에서 Sn 도핑에 따른 흡수 준위가 확인되었다. 또한 Sn 도핑 농도가 증가할수록 밴드갭 에너지는 각각 4.54 eV, 4.50 eV, 4.40 eV, 4.32 eV, 4.30 eV로 밴드갭 에너지가 감소하였다. SIMS 분석을 통해 Sn 도핑 농도를 알 수 있었으며 상용화 웨이퍼와 비교했을 때, Sn 1.5 mol%의 Sn 도핑 농도는 2.95×10^{18} atom/cm³ 값으로 비슷한 측정값을 나타내었다. 이 결과로 Sn의 도핑 첨가 함량은 1~2 mol% 사이가 적정할 것으로 예상되나 추후 최적의 도핑농도를 확립해야 하는 과제가 필수일 것이다. Hall-Effect 분석으로 모든 측정 샘플은 N-type으로 전기전도도에 미치는 다수 캐리어가 전자임을 확인하였으며 Sn 도핑 농도가 증가할수록 캐리어농도는 증

가하며, 이동도는 감소하였고 또한 비저항 값도 감소하였다. 결론적으로 EFG법으로 성장한 Un/Sn-doped β -Ga₂O₃(001) 단결정의 Sn 도핑 농도에 따른 광학적/전기적 특성 변화를 나타내고 있으며, Sn 도핑된 β -Ga₂O₃의 단결정은 전력반도체의 소재로 충분히 사용될 수 있다는 것을 의미하며 앞으로 더욱 고품질 β -Ga₂O₃ 단결정의 성장 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 2023년 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(No. 2019R1A6C1010045)과 2023년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 2023년 산업혁신인재성장지원사업) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2021M3H4A3A01061784).

References

- [1] Baliga, B. Jayant, "Semiconductors for high-voltage, vertical channel field-effect transistors", *J. Appl. Phys.* 53.3 (1982) 1759.
- [2] M. Higashiwaki, H. Murakami, Y. Kumagai and A. Kuramata, "Current status of Ga₂O₃ power devices", *Japanese J. Appl. Phys.* 55.12 (2016) 1202A1.
- [3] H. Aida, K. Nishiguchi, H. Takeda, N. Aota, K. Sunakawa and Y. Yaguchi, "Growth of β -Ga₂O₃ single crystals by the edge-defined, film fed growth method", *Japanese J. Appl. Phys.* 47.11R (2008) 8506.
- [4] X. Ze-Ning, X. Xiang-Qian, L. Yue-Wen, H. Xue-Mei, X. Zi-Li, C. Peng, L. Bin, H. Ping, Z. Rong and Z. You-Dou, "Growth of β -Ga₂O₃ films on sapphire by hydride vapor phase epitaxy", *Chin. Phys. Lett.* 35.5 (2018) 058101.
- [5] Z. Shengnan, L. Xiaozheng, M. Yanchao, L. Weidan, Z. Yingwu, X. Yongkuan and C. Hongjuan, "Growth and characterization of 2-inch high quality β -Ga₂O₃ single crystals grown by EFG method", *J. Semiconductors* 39.8 (2018) 083003.
- [6] F. Bo, M. Wenxiang, Z. Jin, W. Xiqiu, Z. Wenchang, Y. Yanru, J. Zhitai and T. Xutang, "A study on the technical improvement and the crystalline quality optimization of columnar β -Ga₂O₃ crystal growth by an EFG method", *CrystEngComm* 22.30 (2020) 5060.
- [7] H.F. Mohamed, X. Changtai, S. Qinglin, C. Huiyuan, P. Mingyan and Q. Hongji, "Growth and fundamentals of bulk β -Ga₂O₃ single crystals", *J. Semiconductors* 40.1 (2019) 011801.
- [8] X. HuiWen, H. QiMing, J. GuangZhong, L. ShiBing, P. Tao and L. Ming, "An overview of the ultrawide band-gap Ga₂O₃ semiconductor-based Schottky barrier diode for power electronics application", *Nanoscale Res. Lett.*

13.1 (2018) 1.

- [9] N. Suzuki, S. Ohira, M. Tanaka, T. Sugawara, K. Nakajima and T. Shishido, "Fabrication and characterization of transparent conductive Sn-doped β -Ga₂O₃ single crystal", *Phys. Status Solidi C* 4.7 (2007) 2310.
- [10] K. Akito, K. Kimiyoshi, W. Shinya, Y. Yu, M. Takekazu and Y. Shigenobu, "High-quality β -Ga₂O₃ single crystals grown by edge-defined film-fed growth", *Japanese J. Appl. Phys.* 55.12 (2016) 1202A2.
- [11] T. Huili, H. Nuotian, Z. Hao, L. Bo, Z. Zhichao, X. Mengxuan, C. Liang, L. Jinliang, O. Xiaoping and X. Jun, "Inhibition of volatilization and polycrystalline cracking, and the optical properties of β -Ga₂O₃ grown by the EFG method", *CrystEngComm* 22.5 (2020) 924.
- [12] S. Arjan, K. Okan, T. Nicholas, M. Jonathan, J. Debddeep, X. Huili (Grace), P. Hartwin and R. Farhan, "Intra- and inter-conduction band optical absorption processes in β -Ga₂O₃", *Appl. Phys. Lett.* 117.7 (2020) 072103.
- [13] Z. Hajanl, J. Miró, G. Kiss, F. Réti, P. Deák, R.C. Herndon and J.M. Kuperberg, "Role of oxygen vacancy defect states in the n-type conduction of β -Ga₂O₃", *J. Appl. Phys.* 86.7 (1999) 3792.