

# Sn-Doped $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 제작 및 평가

김지형, 김경환, 홍정수 

가천대학교 전기공학과

## Fabrication and Characterization of Sn-Doped $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films

Jihyeong Kim, Kyunghwan Kim, and Jeongsoo Hong

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13306, Korea

(Received October 10, 2024; Revised November 7, 2024; Accepted November 11, 2024)

**Abstract:** In this study, the effect of thickness on the Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films was investigated.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is a next-generation material for power semiconductors and optoelectronics owing to its remarkable properties, such as an ultra-wide bandgap, excellent thermal and chemical stability, and large breakdown voltage. However, its inherently low conductivity can be limiting in applications that require high conductivity; therefore, improving the conductivity of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is important. In this study, Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films with various thicknesses were deposited on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates. All the fabricated samples exhibited  $\beta$ -phase with a uniform and dense surface and transmittance of above 80% in the visible region. In particular, the 100 nm samples showed the highest carrier concentration and mobility and the lowest resistivity. Thus, these findings are expected to play an important role in improving the performance of devices by controlling the thickness of thin films.

**Keywords:**  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Thin film, Ultra-wide bandgap, Sn

### 1. 서론

최근 반도체 기술의 비약적인 발전과 함께 다양한 반도체 소자들이 개발되면서, 이에 맞춰 차세대 재료들에 관한 연구가 주목받고 있다. 그중에서도 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 최근 전자 및 광전자 소자 분야에서 주목받고 있는 넓은 밴드갭(ultra-wide bandgap) 재료로, 특히 전력 소자 및 광검출기 등의 응용 분야에서 두드러진 성능을 보여주고 있다 [1-3].

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에는  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\kappa$  총 여섯 가지의 결정상을 나타내며, 그중  $\beta$ 상은 다른 상들과 비교하여 뛰어난 열적 및 화학적 안정성을 가지며, 매우 넓은 밴드갭 에너지

(4.4~5.0 eV)를 나타낸다 [4-6]. 또한, 다른 wide-bandgap 재료들에 비해 상대적으로 낮은 비용으로 고품질의 단결정 성장을 할 수 있다는 이점이 있으며, 이러한 장점으로 인해 고전력 전자기기의 소재로서 주목되고 있다 [7,8]. 그러나  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소재 자체를 박막으로 제작했을 경우에는 전도성이 다소 낮기 때문에 높은 전도성을 요구하는 응용 분야에서는 한계를 보일 수 있으며, 이로 인해  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 전도성을 향상시키기 위한 방안이 요구된다.

이러한 배경에서 주목받는 접근 방법 중 하나는 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 주석(Sn)을 도핑하여 전기적 특성을 개선하는 것이다. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 본래 산소 공공(oxygen vacancies) 및 갈륨(Ga) 간극으로 인해 N-type 특성을 보인다. 여기서 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 Sn을 도핑하게 되면, 주입된 Sn이 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정 내에서 donor로 작용하여 전도성을 높이며 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 전반적인 전기적 특성을 향상시키는 데 기여한다. 뿐만 아니라 Sn의 이온 반

✉ Jeongsoo Hong; hongjs@gachon.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

경(0.69 Å)은 팔면체로 조정된 Ga (0.62 Å)와 유사하기 때문에 도핑에 적합하고, 이러한 Sn 도핑은 결론적으로  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 캐리어 농도를 증가시키며, 이로 인해 전도성 개선과 함께 소자의 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다 [9-11].

본 연구에서는 RF 스퍼터링(radio frequency sputtering)을 통해 Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 두께를 조절하며  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wafer 위에 증착하였다. 박막의 두께는 박막의 특성 및 소자 성능에 큰 영향을 미치는 파라미터로서, 원하는 물성의 박막을 얻기 위해 고려해야 하는 필수적인 요소이다 [12,13]. 또한, RF 스퍼터링 방식은 비교적 적은 비용으로 고품질의 박막을 얻을 수 있으며, 넓은 면적에 균일하게 증착할 수 있고 접착력이 우수한 박막을 얻을 수 있다는 장점이 있다 [14,15]. 박막의 두께는 증착 시간을 통제하는 방식으로 조절되었고, 박막의 결정화를 위해 증착 이후에 rapid thermal annealing (RTA)을 이용하여 후열처리를 진행하였다. 제작된 Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막은 XRD, SEM, UV-Vis spectrophotometer, hall-effect measurement을 이용하여 두께에 따른 박막의 구조적, 광학적, 전기적 특성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 두께 제어를 통한 특성 변화에 대한 연구를 진행했으며, 이러한 연구 결과는 Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기반 소자의 성능을 향상시키는 데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 박막 증착

본 연구에서는 RF 스퍼터링 시스템을 이용하여 2인치 Sn-doped Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99:1 at%)을 각 100, 300, 1,000 nm 두께로 5×5 mm, (001)- $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wafer 위에 증착하였다.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wafer는 acetone, isopropyl alcohol (IPA), deionized (D.I) water로 각각 10분씩 초음파 세척 후, 이후 질소 가스를 이용하여 건조했다. Base pressure는 3×10<sup>-6</sup> Torr, working pressure는 4 mTorr로 유지되었으며, Ar의 유량은 20 sccm으로 설정되었다. 공정 시작 전 pre-sputtering을 10분 동안 진행하였고, 공정 간 기판을 3 rpm의 속도로 회전시킴으로써 박막의 균일성을 향상시켰다.  $\beta$ 상로의 결정화를 위해, RTA를 이용하여 질소 환경에서 800°로 1분간 후열처리를 진행하였다. 표 1, 2에 본 연구에서 사용된 세부 조건들을 나타내었다.

### 2.2 특성 평가

KLA-Tencor alpha-step 500 profiler을 사용하여 박막의 두께를 측정하였고 증착물을 계산하였다. Hall-effect measurement (HMS-5300, ECOPIA)를 사용하여 박막의 전기적 특성을 평가하였고, UV-visible (UV-vis) spectrophotometer (V-730, Jasco)를 사용하여 광학적 특성을 측정하였다. 박막의 구조적 특성을 평가하기 위해 X-ray diffraction (XRD: SmartLab, Rigaku)를 사용하여 박막의 결정학적 특성을 조사하였고, scanning electron microscopy (SEM: S-4700, Hitachi)를 사용하여 박막의 표면 및 단면 형태를 관찰했다.

**Table 1.** Sputtering conditions.

Parameters	Conditions
Targets	2-inch Sn-doped $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Substrate	(001)- $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wafer
Base pressure	3×10 <sup>-6</sup> Torr
Working pressure	4 mTorr
Gas flow	Ar: 20 SCCM
Input power	200 W
Thickness	100 nm      300 nm      1,000 nm
Deposition rate	13.16 nm/min

**Table 2.** Details for rapid thermal annealing conditions.

Parameters	Conditions
Base pressure	5 mTorr
Working pressure	1 Torr
Temperature	800°C
Time	1 min
Atmosphere	N <sub>2</sub>

**Table 3.** Sample conditions.

Sample	Conditions (thickness)
S1	100 nm
S2	300 nm
S3	1,000 nm

### 3. 결과 및 고찰

그림 1(a)은 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 두께에 따른 XRD 패턴을 보여준다. Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 은 다양한 피크들을 보여주었고, 각 (002), (020), (022)면 (JCPDS card no.43-1012)에 해당하는 피크들은  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막이 성공적으로 제작되었음을 나타낸다 [16].  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막은 두께가 증가할수록 우선 성장 방향인 (002) 피크와 함께 모든 피크의 세기가 증가하였다. 이는 박막의 두께가 증가할수록 박막 표면의 원자들의 이동성이 증가되어 결정성이 향상되었음을 보여준다 [17]. 반면, 1,000 nm 샘플에서는 기존에 관찰되지 않았던 (401), (402), (203), (-204), (204)에 해당하는 peak가 나타났고, 이는 polycrystalline 물질인  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 두께가 증가함에 따라 결정성 향상과 함께 추가적으로 다양한 피크가 생성된 것으로 추정된다. 표 4에 XRD 분석에 사용된 상세 조건들을 명시했다.

**Table 4.** Details for X-ray diffraction conditions.

Parameters	Conditions
Scan method	Grazing incidence (GI)
Angle of Incidence	0.5°
Slit size	5×5 mm
Scan range	15~80°
Scan speed	4°/min

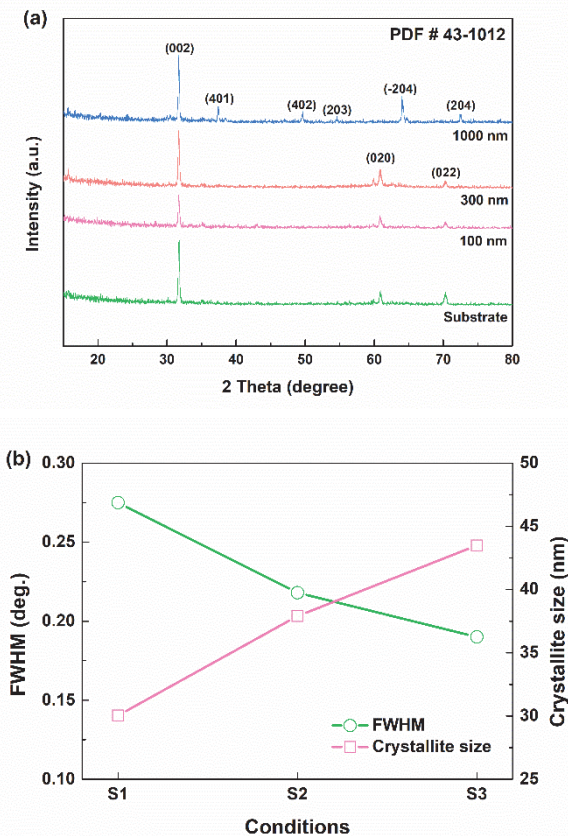
Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 결정립 크기(crystallite size)는 Scherrer equation을 이용하여 박막의 우선 성장 방향인 (002) 피크를 통해 계산되었다 [18].

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

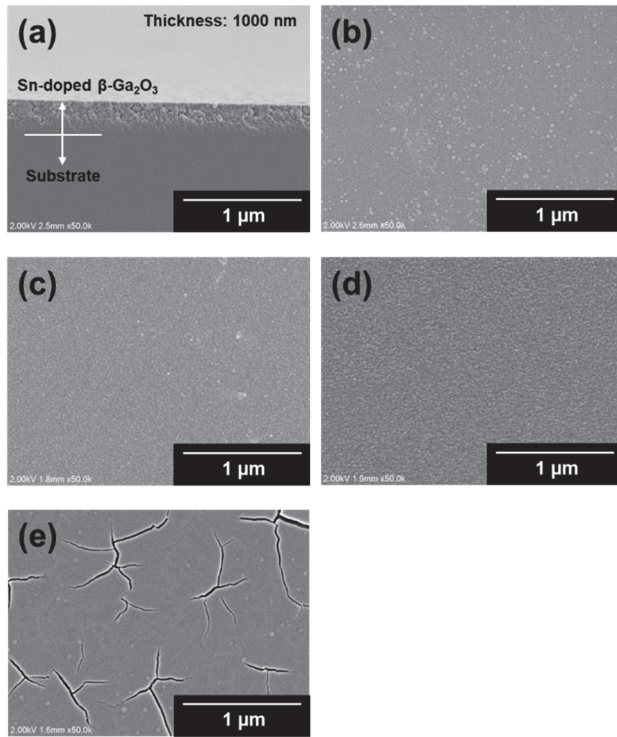
여기서  $\tau$ 는 crystallite size,  $\theta$ 는 bragg angle,  $K$ 는 Scherrer constant, 그리고  $\beta$ 는 피크의 반치폭(FWHM)이다. 이는 피크의 FWHM이 작아질수록 crystallite size는 증가함을 의미한다. 그림 1(b)는 박막 두께에 따른 crystallite size와 FWHM을 나타내고 있다. 앞서 XRD 결과에서 확인했듯이, 박막의 두께가 증가할수록 결정성이 향상되어 (002) 피크의 세기가 증가하였고, 이는 곧 FWHM이 감소했음을 의미한다. 따라서 Scherrer equation에 의해 FWHM이 감소하면 crystallite size는 증가하기 때문에, 결과적으로 1,000 nm 박막의 crystallite size가 43.48 nm를 나타냈다.

그림 2(a)~(d)는 두께별로 증착한 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 단면 및 표면 SEM 사진을 보여준다. 모든 샘플은 고르고 균일한 표면을 보였고, 조건별로 큰 차이는 발견되지 않았다. 그림 2(e)는 사전 연구에서 (100)-Si wafer 위에 증착한 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 표면 사진이다. 해당 결과에서는 기판과 박막 간 열팽창 계수 및 격자 상수의 불일치로 인해 다수의 crack이 발생한 것을 볼 수 있으나, 본 실험에서는 기판과 박막 간 열팽창계수와 격자 상수를 일치시킴으로써 모든 조건에서 crack이 전혀 발생하지 않은 것을 확인했다. 따라서 본 연구를 통해, 박막 표면 crack의 원인은 기판과 박막 간 열팽창계수 및 격자 상수의 불일치라는 사실 또한 확인할 수 있었다.

그림 3에는 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 측정된 두께별로 증착된  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 광학적 특성을 나타내었다. 증착된  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막은 가시광선 영역에서 모두 80% 이상의 높은 투과율을 보이며 투명한 박막이 증착되었음을 확인했다. 광 흡수단은 약 250~260 nm로 박



**Fig. 1.** (a) XRD patterns of the Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films with different thickness and (b) FWHM of the (002) diffraction peaks and the crystallite size.

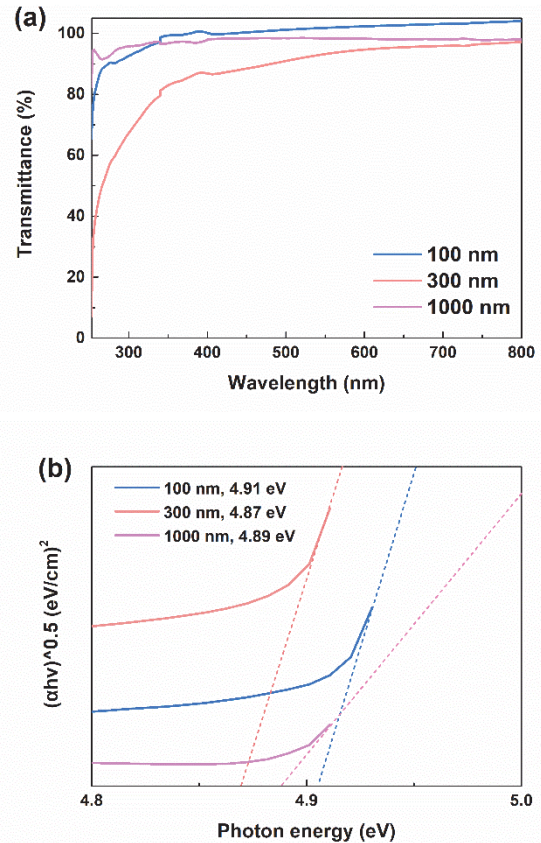


**Fig. 2.** (a) SEM cross-section images of the 300 nm Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  layer on the  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  substrate. (b-d) SEM images of the surface morphology of the Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  layer with different thickness: (b) 100 nm, (c) 300 nm, and (d) 1,000 nm. (e) SEM images of the surface morphology of the Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  layer on (100)-Si wafer.

막 두께가 증가할수록 넓은 파장으로 이동하다가 1,000 nm에서 다시 좁은 파장으로 이동한 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)에서는 Tauc plot을 통해 계산한 광학적 밴드갭 에너지를 나타내었다.

$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

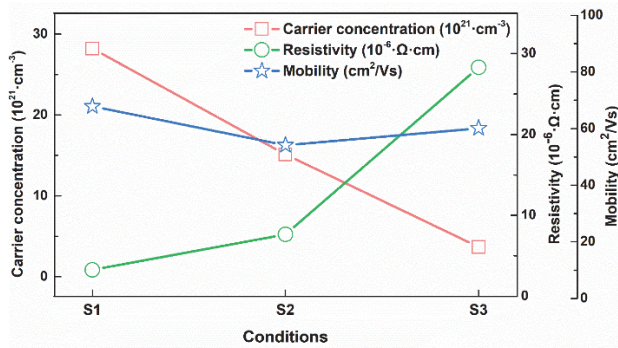
여기서  $\alpha$ 는 흡수 계수,  $h\nu$ 는 광자 에너지,  $A$ 는 상수,  $E_g$ 는 광학적 밴드갭 에너지, 그리고  $n$ 은 회절 차수를 의미한다. 100~300 nm까지는 박막 두께가 증가할수록 광학적 밴드갭 에너지가 감소하였는데, 이는 밴드갭 에너지와 물질의 크기 사이의 관계를 설명하는 quantum size effect로 설명할 수 있다. Quantum size effect는 물질의 크기가 나노미터 단위일 때, 양자적 특성으로 인해 물질의 크기가 증가할수록 밴드갭 에너지가 감소하는 현상이다 [19]. Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 는 두께에 따라 결정립 크기도 증가하였고, 이로 인해 100 nm에서 300 nm까지 두께가 증가할



**Fig. 3.** Optical properties of Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  layer on  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  substrate with different thickness: (a) transmittance and (b) optical bandgap energy.

수록 광학적 밴드갭 에너지는 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면, 1,000 nm 샘플의 경우, 결정립 크기가 가장 크에도 불구하고, 광학적 밴드갭 에너지는 샘플들 중 2번째로 크게 나온 것을 볼 수 있다. 이는  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 는 단사정계 (monoclinic) 구조를 가지며, 각 결정 방향에 따라 광학적 밴드갭 에너지가 이방성(anisotropy)을 보이는데, XRD 결과에서 1,000 nm 샘플은 결정성이 증가함에 따라 새로운 피크가 발생하였고, 따라서 이러한 구조적 특성으로 인해 기존 샘플들과 경향성 차이를 보이는 것으로 추정된다 [20]. 결론적으로 두께가 가장 얇은 100 nm 샘플의 광학적 밴드갭 에너지가 4.91 eV로 가장 높은 수치를 보여주었다.

그림 4에는 hall-effect measurement를 이용하여 측정한 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 두께에 따른 전기적 특성을 나타내었다. 증착된 모든 샘플은 n-type 전도성을 띠며, 캐리어 농도가 약  $10^{21} \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 로, 다른 일반적인  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 보다 상당히 높은 캐리어 농도 수치를 보여준다. 이러한 결과는 앞서 서론에서 언급했듯이,  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 에 Sn을



**Fig. 4.** Electrical properties of the Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films with different thickness.

도핑함으로써 전도성이 향상되었기 때문이다 [21]. 캐리어 농도는 100 nm부터 1,000 nm까지 두께가 증가함에 따라  $2.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 에서  $3.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 로 감소했다. 이는 박막의 결정성 및 산소 공극과 관련이 있는데, 산소 공극은  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  내에서 shallow donor로서의 역할을 하며 전기적 특성에 큰 영향을 미친다. 앞선 XRD 결과에서, 박막의 두께가 증가함에 따라 결정성이 향상됨을 확인하였는데, 따라서 박막의 두께 증가로 인한 결정성의 향상은 point defect인 산소 공극을 감소시키고, 이에 따라 캐리어 농도도 함께 감소한 것으로 추측된다 [22]. 그리고 박막의 두께가 증가함에 따라 비저항도 증가하였는데, 이는 캐리어 농도의 감소로 인한 것으로 보인다. 또한, 이동도는 샘플 간 큰 차이가 없이 비슷하나, 두께가 증가할수록 소폭 감소하는 경향을 보여준다. 결론적으로, 두께가 100 nm인 샘플의 캐리어 농도가  $2.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , 이동도가  $67.8 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 로서 가장 높고, 비저항은  $3.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 로서 가장 낮아서, 전기적 특성이 가장 우수함을 보여주었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 RF 스퍼터링을 이용하여 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막을 두께에 따라 증착하였다. XRD 측정 결과, Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막은 두께가 증가함에 따라 (002) 피크를 중심으로 모든 피크의 세기가 증가하였으며, 결과적으로 박막의 두께가 증가할수록 결정성이 향상됨을 알 수 있었다. UV-Vis spectrophotometer 측정 결과, 모든 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막은 가시광선 영역에서 80% 이상의 투과율을 보여주었고, 1,000 nm를 제외한 나머지 샘플은 두께가 증가할수록 광학적 밴드갭 에너지가 감소하는 경향을 보였다. 전기적 특성의 경우, 박막의 두께가 증가

할수록 캐리어 농도는 감소했고, 비저항은 증가하였으며, 이동도는 비슷하거나 소폭 감소하였다. 결론적으로, 박막의 두께는 박막의 다양한 특성에 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었고, 박막의 두께를 조절하여 Sn-doped  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  기반 소자의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 2022년 산업혁신인재성장지원사업) 및 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(RS-2023-00227306)으로 수행된 연구임.

#### ORCID

Jeongsoo Hong

<https://orcid.com/0000-0002-5946-7815>

#### REFERENCES

- [1] D. Guo, Q. Guo, Z. Chen, Z. Wu, P. Li, and W. Tang, *Mater. Today Phys.*, **11**, 100157 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.100157>
- [2] L. K. Ping, D. D. Berhanuddin, A. K. Mondal, P. S. Menon, and M. A. Mohamed, *Chin. J. Phys.*, **73**, 195 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2021.06.015>
- [3] P. Jaiswal, U. Ul Muazzam, A. S. Pratiyush, N. Mohan, S. Raghavan, R. Muralidharan, S. Shivashankar, and D. N. Nath, *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 021105 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5010683>
- [4] Z. Galazka, *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 113001 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aadf78>
- [5] M. Higashiwaki, *AAPPS Bull.*, **32**, 3 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00033-0>
- [6] T. Park, K. Kim, and J. Hong, *Coatings*, **11**, 1391 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11111391>
- [7] S. Park, T. Park, J. H. Park, J. Y. Min, Y. Jung, S. Kyoung, T. Y. Kang, K. H. Kim, Y. S. Rim, and J. Hong, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 25648 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c03193>
- [8] M. Baldini, Z. Galazka, and G. Wagner, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **78**, 132 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.10.040>
- [9] M. J. Tadjer, J. L. Lyons, N. Nepal, J. A. Freitas Jr., A. D. Koehler, and G. M. Foster, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**,

- Q3187 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1149/2.0341907jss>
- [10] P. Mandal, S. Kumar, A. Pandey, L. Katariya, A. Mondal, and A. Bag, *Mater. Sci. Eng. B*, **302**, 117266 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117266>
- [11] Y. Yoon, S. Kim, I. G. Lee, B. J. Cho, and W. S. Hwang, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **121**, 105430 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105430>
- [12] F. Güzelçimen, B. Tanören, Ç. Çetinkaya, M. D. Kaya, H. İ. Efker, Y. Özen, D. Bingöl, M. Sirkeci, B. Kınacı, M. B. Ünlü, and S. Özçelik, *Vacuum*, **182**, 109766 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109766>
- [13] B. A. Ali, A. Bouhmouche, L. Wendling, C. Hu, C. Bouillet, G. Schmerber, A. M. Saeedi, S. Zafeiratos, V. Papaefthimiou, R. Moubah, and S. Colis, *Vacuum*, **216**, 112411 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112411>
- [14] Y. Liao, S. Jiao, S. Li, J. Wang, D. Wang, S. Gao, Q. Yu, and H. Li, *CrystEngComm*, **20**, 133 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C7CE01567D>
- [15] A. K. Singh, M. Gupta, V. Sathe, and Y. Katharria, *Superlattices Microstruct.*, **156**, 106976 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106976>
- [16] H. E. Jang, H. H. Cho, H. K. Yu, J. Y. Choi, and J. H. Park, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **43**, 2534 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.040>
- [17] H. Yang, Y. Liu, X. Luo, Y. Li, D. S. Wu, K. He, and Z. C. Feng, *Superlattices Microstruct.*, **131**, 21 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.05.028>
- [18] S. Fatimah, R. Ragadhita, D. F. Al Husaeni, and A.B.D. Nandiyanto, *ASEAN J. Sci. Eng.*, **2**, 65 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37647>
- [19] A. Van Dijken, E. A. Meulenkamp, D. Vanmaekelbergh, and A. Meijerink, *J. Lumin.*, **90**, 123 (2000).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(99\)00599-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(99)00599-2)
- [20] F. Ricci, F. Boschi, A. Baraldi, A. Filippetti, M. Higashiwaki, A. Kuramata, V. Fiorentini, and R. Fornari, *J. Phys.: Condens. Matter*, **28**, 224005 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/22/224005>
- [21] J. N. Dang, S. W. Zheng, L. Chen, and T. Zheng, *Chin. Phys. B*, **28**, 016301 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1088/1674-1056/28/1/016301>
- [22] S. Bhowmick, R. Saha, M. Mishra, A. Sengupta, S. Chattopadhyay, and S. Chakrabarti, *Mater. Today Commun.*, **33**, 104766 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104766>