

Effects of deposition temperature and post-annealing on the structural and optical properties of Ga₂O₃ thin films deposited by rf magnetron sputtering

Byoung Su Choi, Jung Yong Son*, Yu Mi Kim*, Tae Jun Ahn*, Sungu Hwang**, Jeong Ho Ryu***, Byeong Woo Lee**** and Hyun Cho**,*†

Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Gyeongnam 50463, Korea

**Department of Nanomechanics Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

***Department of Transdisciplinary Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

****Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

*****Department of Ocean Advanced Convergence Engineering, Korean Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea*

(Received August 21, 2026)

(Revised September 4, 2026)

(Accepted September 4, 2026)

Abstract The effects of deposition temperature and post-annealing on the structural and optical properties of Ga₂O₃ thin films deposited by RF magnetron sputtering were investigated. As the deposition temperature increased from room temperature to 400°C, the deposition rate slightly increased from 2.29 nm/min to 2.45 nm/min. The Ga₂O₃ thin films deposited at various substrate temperatures primarily exhibited the ε-Ga₂O₃ phase, with a slight improvement in crystallinity as the deposition temperature increased. After annealing at 800°C in air, the ε-Ga₂O₃ and β-Ga₂O₃ phases coexisted due to the progression of the phase transition to the β-Ga₂O₃ phase. After annealing at 1,000°C, the films were completely transformed into the thermodynamically stable β-Ga₂O₃ phase. In addition, the grain size increased with increasing annealing temperature. The as-deposited Ga₂O₃ films exhibited a high visible-light transmittance of approximately 88% and optical bandgaps of 4.67~4.80 eV. Post-annealing at 1,000°C in air was found to induce stabilization of the crystal structure and optical properties of the Ga₂O₃ films, resulting in the convergence of the optical bandgap to a narrow range of 4.73~4.76 eV. The Ga₂O₃ thin films deposited by RF magnetron sputtering and subsequently annealed at 1,000°C in air exhibited an optical absorption edge of approximately 260~262 nm, indicating their potential suitability for solar-blind UV photodetector applications.

Key words Ga₂O₃ thin film, Solar blind photodetector, Substrate temperature, Post-annealing, Crystalline phase, Optical bandgap

RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 Ga₂O₃ 박막의 구조적 및 광학적 특성에 미치는 증착온도 및 후열처리의 영향

최병수, 손정용*, 김유미*, 안태준*, 황승구**, 류정호***, 이병우****, 조현**,*†

부산대학교 나노융합기술학과, 밀양, 50463

*부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 부산, 46241

**부산대학교 첨단융합학부, 부산, 46241

***한국교통대학교 반도체신소재공학과, 충주, 27469

****한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 부산, 49112

(2026년 8월 21일 접수)

(2026년 9월 4일 심사완료)

(2026년 9월 4일 게재확정)

요약 증착 온도 및 후열처리가 RF magnetron sputtering으로 증착한 Ga₂O₃ 박막의 구조적 및 광학적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 상온에서 400°C로 증착 온도가 증가함에 따라 증착 속도가 2.29 nm/min에서 2.45 nm/min으로 소폭 증가하였다. 다양한 기판 온도에서 증착된 Ga₂O₃ 박막은 주로 ε-Ga₂O₃ 상이 형성되었고, 증착 온도가 증가함에 따라 결정성

†Corresponding author

E-mail: hyuncho@pusan.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/>).

이 다소 향상되었다. 800°C, air 분위기에서 후열처리 후 β -Ga₂O₃ 상으로의 상전이가 진행됨에 따라 ϵ -Ga₂O₃와 β -Ga₂O₃ 상이 공존하였고, 1,000°C 후열처리 후에는 안정한 β -Ga₂O₃ 상으로 완전히 전이되었다. 또한 후열처리 온도가 증가함에 따라 결정립 크기도 증가하였다. 증착 직후 박막은 약 88%의 높은 가시광선 투과율과 4.67~4.80 eV의 광학적 밴드갭을 나타내었으며, 1,000°C 후열처리는 Ga₂O₃ 박막의 결정구조와 광학적 특성 안정화를 유도함으로써 4.73~4.76 eV의 좁은 범위로 밴드갭이 수렴함을 확인하였다. RF magnetron sputtering으로 증착하고 1,000°C, air 분위기에서 후열처리된 Ga₂O₃ 박막은 solar-blind UV photodetector로의 응용에 적합한 약 260~262 nm의 광학적 흡수 경계 특성을 나타내었다.

1. 서 론

자외선(Ultraviolet, UV)은 가시광선보다 파장이 짧은 전자기파로서 태양광의 일부분이며, 일반적으로 파장 영역에 따라 UVA(320~400 nm), UVB(280~320 nm), UVC(200~280 nm) 및 VUV(Vacuum UV, 10~200 nm)로 구분된다. 태양으로부터 방출된 UVC 영역의 자외선은 지구 대기를 통과하는 과정에서 산소와 오존에 의해 강하게 흡수되므로 지표면에서는 태양광에서 기원한 UVC 자외선이 거의 존재하지 않는다. 따라서 파장 200~280 nm의 파장 영역은 지표면에서 태양광 간섭 없이 자외선 신호를 검출할 수 있는 solar-blind 영역으로 정의된다. 이러한 특성으로 인해 solar-blind 영역의 자외선은 낮은 광학적 배경 신호(background optical noise)에 기인한 높은 신호대잡음비(signal-to-noise ratio), 높은 검출 감도 및 낮은 오경보 가능성 등의 장점을 가지며, 이를 기반으로 오존층 모니터링, 화염 감지, 미사일 조기경보, 신호 전달 및 통신 등 다양한 분야에 활용될 수 있다[1-3].

이와 같이 solar-blind 자외선의 다양한 활용 가능성이 확대됨에 따라, 낮은 암전류(dark current)와 높은 광응답도(responsivity), 높은 광검출도(detectivity), 빠른 응답 특성을 동시에 구현할 수 있는 고성능 solar-blind photodetector(SBPD)의 개발이 중요해지고 있다. SBPD용 광흡수층 소재로는 SiC, diamond, AlN, GaN, AlGaIn 및 ZnMgO 등 다양한 wide bandgap 반도체가 연구되어 왔다. 그러나 일부 반도체는 solar-blind 파장 영역에 적합한 밴드갭 특성을 확보하기 위해 합금 조성의 정밀한 제어가 요구되거나, 고품질 박막 형성을 위한 복잡한 성장 및 증착 공정을 필요로 한다. 최근 약 4.7~5.3 eV의 초광대역 밴드갭(ultra-wide bandgap)을 가지는 산화갈륨(Ga₂O₃)은 solar-blind 영역의 자외선에 대한 우수한 선택성을 나타낼 수 있는 유망한 SBPD용 반도체 소재로 주목받고 있다. 특히 Ga₂O₃는 높은 절연파괴 전계와 우수한 화학적 및 열적 안정성을 가지며, 비교적 대면적의 벌크 단결정 성장뿐만 아니라 다양한 박막 증착공정을 적용할 수 있어 고성능, 저비용 SBPD 구현을 위한 차세대 반도체 소재로 활발히 연구되고 있다[4-8].

다섯 가지의 Ga₂O₃ 결정상 중 열역학적으로 가장 안정한 β -Ga₂O₃는 약 4.6~4.9 eV의 넓은 밴드갭 에너지와

높은 절연파괴 전계, 우수한 화학적 및 열적 안정성, 높은 광학적 투과도 및 기계적 강도를 동시에 갖는 초광대역 반도체이다. 특히 β -Ga₂O₃의 넓은 밴드갭 에너지에 기인한 광흡수 차단 파장은 약 250~270 nm 범위에 위치하여 solar-blind 영역의 자외선에 대해 우수한 파장 선택성을 나타낸다. 이러한 특성은 가시광선 및 장파장 자외선에 대한 불필요한 광응답을 억제하면서 solar-blind UV에 대한 선택적 광검출을 가능하게 하므로, β -Ga₂O₃는 solar-blind UV photodetector용 반도체 소재로서 큰 주목을 받고 있다. 기존의 β -Ga₂O₃ 기반 solar-blind UV photodetector는 주로 고품질 β -Ga₂O₃ 단결정 웨이퍼 또는 에피택시 박막을 기반으로 제작되어 왔다. 그러나 이러한 고품질 단결정 및 에피택시 박막의 성장에는 상대적으로 높은 제조비용과 복잡한 공정이 요구되므로, 최근에는 보다 낮은 비용으로 대면적 증착이 가능한 다결정 β -Ga₂O₃ 박막 기반 solar-blind UV photodetector에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[9-15].

다양한 다결정 β -Ga₂O₃ 박막 제조공정 중 RF magnetron sputtering은 비교적 낮은 공정 비용으로 대면적 기판에 균일한 박막을 증착할 수 있을 뿐만 아니라 기판 온도, RF power, 공정 압력 및 산소 분압 등의 공정변수 제어를 통해 박막의 결정구조와 미세구조 및 광학적 특성을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 RF magnetron sputtering으로 증착된 Ga₂O₃ 박막의 증착속도, 결정상, 광투과율 및 optical bandgap에 미치는 증착 온도의 영향을 조사하였다. 또한 증착된 Ga₂O₃ 박막의 후열처리(post-annealing)에 따른 결정상, 광투과율 및 optical bandgap 특성의 변화를 비교 분석하였다. 이를 통해 증착 온도 및 후열처리 공정이 Ga₂O₃ 박막의 구조적 및 광학적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험 과정

Ga₂O₃ 박막은 직경 3인치 Ga₂O₃ 타겟을 사용하여 RF magnetron sputtering system(LAT, 부산대학교)으로 증착하였다. 증착용 기판으로는 플라즈마 화학기상증착장치(PECVD, LAT, 부산대학교)로 약 300 nm 두께의 SiO₂ 절연층이 증착된 SiO₂/Si 웨이퍼 및 quartz 기판을

사용하였다. 기판 표면을 에탄올, 이소프로필 알콜, DI water 순으로 세정한 후 챔버 내 스테이지에 장착하였다. Ga_2O_3 박막 증착을 시작하기 전에 타겟 표면의 불순물 또는 오염물을 제거하기 위해 순수 Ar 플라즈마로 10분 동안 타겟 표면을 pre-sputtering하였다. Ga_2O_3 박막 증착을 위한 스퍼터링 가스로는 Ar과 산소를 각각 30 sccm과 3 sccm으로 혼합하여 사용하였고, 증착시 압력은 10 mTorr로 유지하였다. Ga_2O_3 박막 증착은 RF power 100~250 W, 기판온도 상온 -400°C 로 변화시킨 조건들에서 진행하였다. 또한 증착된 Ga_2O_3 박막의 후열처리하는 전기로를 이용하여 800°C 및 $1,000^\circ\text{C}$, 산화(air) 분위기에서 2시간 동안 진행하였다. 각각의 조건에서 증착된 박막의 두께는 Stylus Profiler(alpha-step D-500, KLA-Tencor)로 측정하였고, 증착 직후 및 후열처리된 박막의 결정상 및 결정성은 X-선 회절분석기(X'Pert³, Malvern Panalytical)로 분석하였다. UV-Visible spectrophotometer (V-770, JASCO)로 각각의 증착 조건에서 quartz 기판에 증착된 Ga_2O_3 박막 시편들의 광투과율을 측정하였고, 광학적 밴드갭은 Tauc plot으로 근사하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1은 기판 온도 상온, 공정압력 10 mTorr 및 Ar/ O_2 혼합가스(30/3 sccm) 분위기에서 RF magnetron sputtering으로 증착한 Ga_2O_3 박막의 RF power에 따른 증착속도 변화를 나타낸 것이다. RF power가 100 W에서 250 W까지 증가함에 따라 Ga_2O_3 박막의 증착속도는 0.9 nm/min에서 2.7 nm/min으로 지속적으로 증가하였다. 일반적으로 RF power가 증가함에 따라 타겟에 형성되는 음의 self-bias 전압 및 타겟 sheath 내 전위차가 증가하여 타겟 표면으로 입사하는 Ar^+ 이온의 플럭스

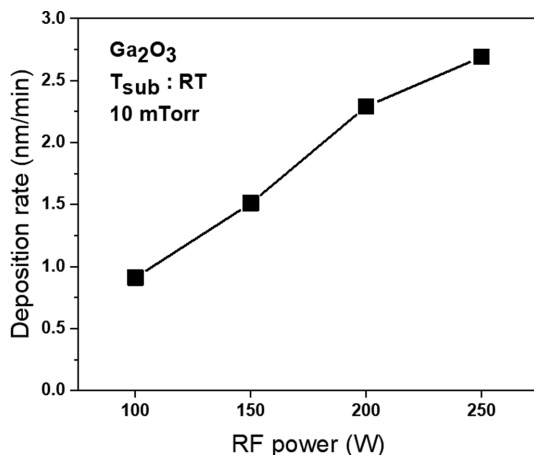


Fig. 1. Deposition rate of Ga_2O_3 thin films as a function of RF power at room temperature and a working pressure of 10 mTorr.

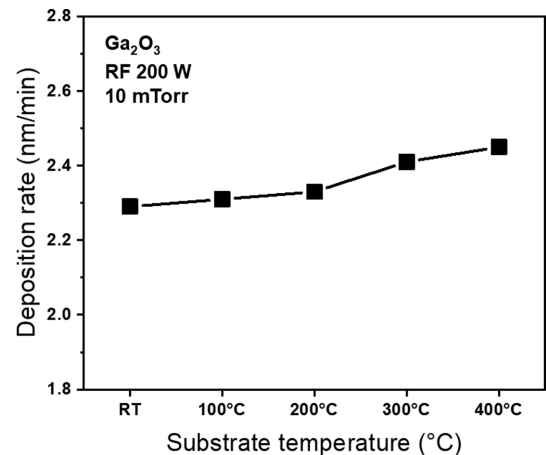


Fig. 2. Deposition rate of Ga_2O_3 thin films as a function of substrate temperature at an RF power of 200 W and a working pressure of 10 mTorr.

(flux)와 가속 에너지가 증가하게 된다. 이에 따라 Ar^+ 이온의 충돌에 의한 타겟 표면으로의 에너지 전달이 증가함으로써 Ga_2O_3 타겟으로부터 스퍼터링되어 방출되는 Ga 및 O 원자의 수가 증가하게 된다. 즉 RF power 증가에 따른 Ar^+ 이온의 충돌 에너지 및 이온 플럭스 증가로 인해 Ga_2O_3 타겟의 sputtering yield가 증가하고, 이에 따라 기판에 도달하는 증착 입자의 플럭스가 증가함으로써 Ga_2O_3 박막의 증착속도가 증가한 것으로 판단된다.

Figure 2는 RF power 200 W, 공정압력 10 mTorr 및 Ar/ O_2 혼합가스 분위기에서 RF magnetron sputtering으로 증착한 Ga_2O_3 박막의 기판 온도에 따른 증착속도 변화를 보여주고 있다. 기판 온도가 상온에서 400°C 까지 증가함에 따라 Ga_2O_3 박막의 증착속도는 약 2.29 nm/min에서 약 2.45 nm/min으로 완만하게 증가하였다. 기판 온도에 따른 Ga_2O_3 박막 증착속도의 전체적인 변화 폭은 약 7% 수준으로 비교적 작게 나타났으며, 이는 일정한 RF power와 공정압력 조건에서 기판 온도가 타겟 표면의 sputtering yield 자체에 미치는 영향이 제한적임을 의미한다. 따라서 관찰된 증착속도의 증가는 타겟으로부터 방출되는 스퍼터링 입자의 양적 증가보다는 기판 온도 상승에 따른 기판 표면에서의 스퍼터링 입자의 흡착 및 응축 거동 변화와 관련된 것으로 판단된다. 기판 온도가 증가함에 따라 기판 표면에서의 원자 이동도와 표면 확산이 증가하고, 이에 따라 증착 입자의 재배열 및 안정적인 박막 성장이 촉진됨으로써 증착속도가 소폭 증가한 것으로 보인다.

기판 온도를 상온(RT), 100, 200, 300 및 400°C 로 변화시키면서 RF magnetron sputtering으로 증착된 Ga_2O_3 박막의 증착 직후, 800°C 및 $1,000^\circ\text{C}$, air 분위기에서 각각 2시간 동안 후열처리한 후의 결정구조 변화를 X-선

회절 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 증착 직후의 Ga₂O₃ 박막에서는 200°C를 제외한 모든 기판 온도 조건에서 약 62° 부근에서 ϵ -Ga₂O₃ (114) 결정면에 해당하는 회절 피크가 관찰되었으며, 기판 온도가 증가함에 따라 피크 강도 및 결정성이 다소 향상되는 경향을 나타내었다. 이는 본 연구의 증착 조건에서 기판 온도와 관계없이 ϵ -Ga₂O₃ 결정상이 우선적으로 형성되었음을 의미한다. 이후 800°C, Air 분위기에서 후열처리를 실시한 결과, 증착 직후 관찰되었던 ϵ -Ga₂O₃ 피크와 함께 β -Ga₂O₃에 해당하는 새로운 회절 피크들이 관찰되었다. 회절각 ~31° 부근에서 β -Ga₂O₃ (002) 결정면에 해당하는 회절 피크가 나타났으며, 고각 영역에서는 β -Ga₂O₃ (11-1) 및 (221) 결정면과 ϵ -Ga₂O₃ (152) 결정면에 해당하는 피크들이 함께 관찰되었다. 이러한 결과는 800°C 후열처리에 따라 준안정 상태의 ϵ -Ga₂O₃ 결정상이 열역학적으로 가장 안정한 β -Ga₂O₃ 결정상으로 전이되고 있음을 보여준다. 즉, 800°C 후열처리 후에도 ϵ 상과 β 상이 동시에 존재함에 따라 $\epsilon \rightarrow \beta$ 상전이가 진행 중인 것으로 해석할 수 있다. 반면에 1,000°C, air 분위기에서 후열처리를 진행한 이후 모든 시편에서는 ϵ -Ga₂O₃에 해당하는 회절 피크가 소멸하고 β -Ga₂O₃ (002), (11-1) 및 (221) 결정면에 해당하는 회절 피크만이 관찰되었다. 이는 1,000°C의 고온 후열처리를 통해 증착 직후 형성된 준안정 ϵ -

Ga₂O₃ 상이 열역학적으로 안정한 β -Ga₂O₃ 상으로 완전히 전이되었음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 RF magnetron sputtering으로 증착한 Ga₂O₃ 박막은 증착 후 ϵ -Ga₂O₃ 결정상이 우세하게 형성되며, 후열처리 온도가 증가함에 따라 ϵ -Ga₂O₃에서 β -Ga₂O₃로의 상전이가 진행되어 1,000°C에서 안정한 β -Ga₂O₃ 결정상으로 완전히 전이되는 것을 확인하였다.

Figure 4는 기판 온도 400°C 조건에서 증착 직후, 800°C 및 1,000°C, air 분위기에서 각각 후열처리한 후의 Ga₂O₃ 박막의 표면 미세구조를 FE-SEM으로 관찰한 이미지이다. 증착 직후의 Ga₂O₃ 박막은 상대적으로 미세한 입자들이 치밀하게 분포하는 표면 형상을 나타내었다. 800°C에서 후열처리한 박막은 증착 직후와 비교하여 표면 입자 간의 경계가 보다 뚜렷하게 관찰되었으며, 열에너지에 의해 미세한 입자들의 재배열 및 결정화가 진행된 것으로 보인다. 이는 XRD 분석에서 ϵ -Ga₂O₃ 상과 β -Ga₂O₃ 상이 공존하여 $\epsilon \rightarrow \beta$ 상전이가 진행되는 것으로 확인된 결과와 잘 일치한다. 한편, 1,000°C에서 후열처리한 박막에서는 입자의 크기가 증가하고 입자 간 경계가 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 표면 미세구조의 변화는 고온 후열처리에 따른 원자의 표면 확산 증가와 결정립 성장에 기인한 것으로 해석할 수 있다. Fig. 3에 제시한 XRD 패턴에서 β -Ga₂O₃ (002) 회절 피크를 이

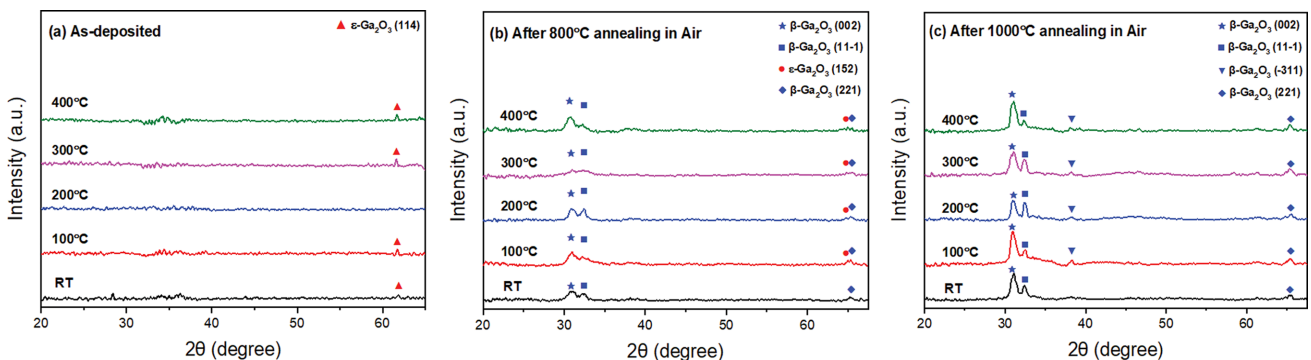


Fig. 3. XRD patterns of RF magnetron-sputtered Ga₂O₃ thin films deposited at different substrate temperatures: (a) as-deposited, (b) after annealing at 800°C in air, and (c) after annealing at 1,000°C in air.

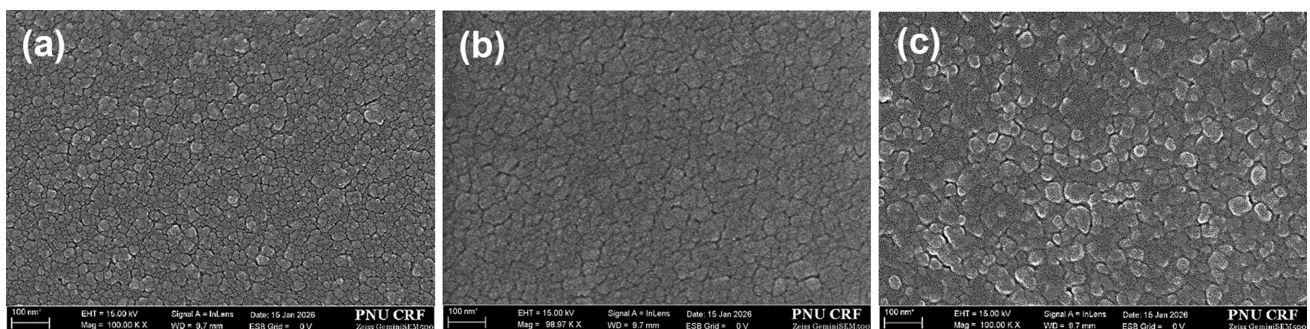


Fig. 4. FE-SEM micrographs of the surface morphology of Ga₂O₃ thin films deposited at a substrate temperature of 400°C: (a) as-deposited, (b) after annealing at 800°C in air, and (c) after annealing at 1,000°C in air.

용하여 Scherrer 식[16]으로 계산한 평균 결정립 크기는 800°C 및 1,000°C 후열처리 후 각각 약 7.83 nm 및 9.58 nm로 근사되었다. 이러한 결과로부터 후열처리 온도가 증가함에 따라 Ga_2O_3 박막은 열역학적으로 안정한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 상으로의 상전이가 진행되는 동시에 결정화와 결정립 성장이 촉진되었음을 확인할 수 있다.

Figure 5는 다양한 기판 온도 조건에서 약 300 nm 두께로 증착한 Ga_2O_3 박막의 증착 직후 및 1,000°C, air 분위기에서 2시간 동안 후열처리한 후의 광투과율과 Tauc plot을 비교한 결과이다. 증착 직후 모든 시편은 가시광선 영역에서 약 88 %의 높은 광투과율을 나타내었으며, 약 300 nm 이하의 자외선 영역으로 갈수록 광흡수가 급격히 증가하는 특성을 보였다. 또한 광투과율 스펙트럼에서 관찰되는 간섭무늬는 박막 표면과 기판 계면에서의 다중 반사에 따른 광학적 간섭 현상에 기인하며, 각 시편의 두께, 굴절률 및 표면·계면 특성의 차이에 따라 그 양상이 다르게 나타난 것으로 판단된다. Tauc plot으로부터 근사된 광학적 밴드갭 에너지는 기판 온도가 상온에서 400°C로 증가함에 따라 각각 4.73, 4.67, 4.76, 4.79 및 4.80 eV로 근사되었다. 100°C에서 증착된 박막의 밴드갭이 가장 낮게 나타났으나, 전반적으로 증착온도 증가에 따라 광학적 밴드갭이 소폭 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 1,000°C에서 후열처리한 시편들

은 증착 직후에 비해 광투과율이 다소 감소하였으나, 80.9~85 % 범위의 비교적 높은 광투과율을 유지하였다. 또한 증착 직후 시편과 비교하여 광투과율의 간섭무늬 양상과 광흡수단의 위치가 변화하였다. 이는 고온 후열처리 과정에서 박막의 결정상 변화와 결정립 성장 및 구조적 치밀화가 발생함에 따라 박막의 굴절률과 광학적 특성이 변화하였기 때문으로 판단된다. 후열처리 후 Tauc plot으로부터 근사된 광학적 밴드갭 에너지는 상온, 100, 200, 300 및 400°C에서 증착된 시편에 대해 각각 4.73, 4.74, 4.75, 4.75 및 4.76 eV로 나타났다. 따라서 1,000°C 후열처리 후에는 모든 시편의 광학적 밴드갭 에너지가 4.73~4.76 eV의 좁은 범위로 수렴하였다. 이러한 결과는 고온 열처리에 의해 증착온도에 따른 초기 박막의 구조적 차이가 감소하고, 열역학적으로 안정한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 결정상의 형성 및 결정구조의 안정화가 이루어진 결과로 판단된다. 특히, 후열처리 후 얻어진 4.73~4.76 eV의 광학적 밴드갭 에너지는 약 260~262 nm의 광학적 흡수 경계 파장에 해당하므로, 태양광 스펙트럼에서 지표면에 거의 도달하지 않는 UVC 영역에 선택적으로 반응하는 solar-blind UV photodetector 소자로의 응용에 적합한 광학적 특성을 나타낸다. 또한 가시광선 및 근자외선 영역에서의 높은 광투과율은 이들 장파장 영역에서의 광흡수가 낮음을 의미하므로, 가시광선에 의한

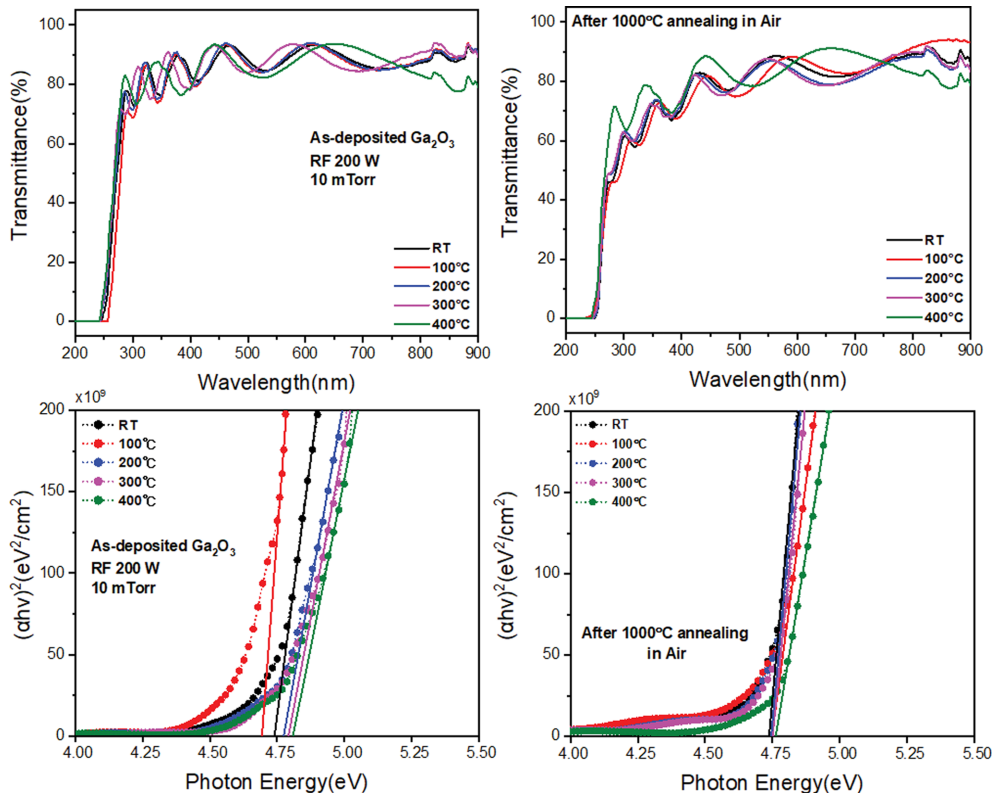


Fig. 5. Optical transmittance spectra (top) and Tauc plots (bottom) of RF magnetron-sputtered Ga_2O_3 thin films deposited at different substrate temperatures before (left) and after (right) annealing at 1,000°C in air.

불필요한 광응답을 억제하면서 solar-blind 영역의 자외선만을 선택적으로 검출할 수 있는 높은 파장 선택성을 확보할 수 있음을 시사한다. 따라서 고온 후열처리는 RF magnetron sputtering으로 증착된 Ga₂O₃ 박막의 결정구조 및 광학적 특성을 안정화함으로써 solar-blind UV photodetector 응용을 위한 균일하고 안정적인 광흡수 특성 확보에 효과적인 공정임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 RF magnetron sputtering으로 증착된 Ga₂O₃ 박막의 증착 조건 및 후열처리에 따른 증착속도, 결정구조 및 광학적 특성 변화를 분석하고 solar-blind UV photodetector로의 응용 가능성을 평가하였다. RF power가 100 W에서 250 W로 증가함에 따라 증착속도는 0.9 nm/min에서 2.7 nm/min으로 증가하였으며, 이는 Ar⁺ 이온 플럭스와 에너지 증가에 따른 sputtering yield 향상에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 기판 온도를 상온에서 400°C까지 증가시켰을 때 증착속도는 소폭 증가하였다. X-선 회절 분석 결과, 증착 직후 박막에서는 주로 ε-Ga₂O₃ 상이 형성되었으며, 800°C 후열처리 후에는 ε-Ga₂O₃와 β-Ga₂O₃ 상이 공존하여 ε → β 상전이가 진행됨을 확인하였다. 1,000°C 후열처리 후에는 β-Ga₂O₃ 상으로 완전히 전이되었으며, 평균 결정립 크기는 800°C 및 1,000°C 후열처리 후 각각 약 7.83 nm 및 9.58 nm로 증가하였다. 증착 직후 박막은 약 88 %의 높은 가시광선 투과율과 4.67~4.80 eV의 광학적 밴드갭을 나타내었으며, 1,000°C 후열처리 후에는 증착 직후에 비해 다소 낮은 80.9~85 %의 광투과율을 나타내었으나, β-Ga₂O₃ 결정구조와 광학적 특성이 안정화됨에 따라 4.73~4.76 eV의 좁은 범위로 수렴한 광학적 밴드갭을 나타내었다. 이 결과로부터 대면적 기판에 비교적 균일한 박막을 증착할 수 있는 RF magnetron sputtering으로 증착된 Ga₂O₃ 박막과 1,000°C 후열처리 공정은 solar-blind UV photodetector 광흡수층으로의 높은 응용 가능성을 가짐을 확인하였다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Q. Cai, H. You, H. Guo, J. Wang, B. Liu, Z. Xie, D. Chen, H. Lu, Y. Zheng and R. Zhang, "Progress on AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetectors and focal plane arrays", *Light Sci. Appl.* 10 (2021) 94.
- [2] X. Chen, F. Ren, S. Gu and J. Ye, "Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors", *Photon. Res.* 7 (2019) 381.
- [3] L. Wang, S. Xu and J. Yang, "Recent progress in solar-blind photodetectors based on ultrawide bandgap semiconductors", *ACS Omega* 9 (2024) 25429.
- [4] M.H. Hasan, M.M.U. Rahman, H.T. Nguyen and Y.H. Kim, "Recent advances in deep-ultraviolet photodetectors: Materials, device structures, and applications", *Adv. Funct. Mater.* 35 (2025) 2413370.
- [5] U. Varshney, N. Aggarwal and G. Gupta, "Current advances in solar-blind photodetection technology: using Ga₂O₃ and AlGaIn", *J. Mater. Chem. C* 10 (2022) 1573.
- [6] J.K. Kim, M.H. Kim, J.H. Lim, H.S. Lee and J.Y. Park, "Comparison of AlGaIn-based and Ga₂O₃-based solar-blind photodetectors", *Semicond. Sci. Technol.* 39 (2024) 045009.
- [7] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Gallium oxide (Ga₂O₃) materials and devices", *Semicond. Sci. Technol.* 31 (2016) 034001.
- [8] S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer and M.A. Mastro, "A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices", *Appl. Phys. Rev.* 5 (2018) 011301.
- [9] M. Higashiwaki, "β-Ga₂O₃ material properties, growth technologies, and devices: a review", *AAPPS Bull.* 32 (2022) 3.
- [10] R.S.M. Tan, K.H. Lee, M.H.D. Othman and M.A. Rahman, "Recent progress in the growth of β-Ga₂O₃ for power electronics applications", *Mater. Sci. Semicond. Process.* 78 (2018) 132.
- [11] A.C. Liu, Y.C. Huang, S.W. Chang, Y.F. Chen and Y.J. Hsu, "State-of-the-art β-Ga₂O₃ field-effect transistors for power electronics", *ACS Omega* 7 (2022) 36415.
- [12] M.A. Salam, C. Jiang, F. Zhao and W. Lu, "Ga₂O₃ deep-ultraviolet photodetectors: Materials, device architectures, and performance frontiers", *ACS Appl. Electron. Mater.* 8 (2026) 2740.
- [13] X. Wang, X. Chang, X. Yang and L. Yuan, "Research progress and prospect of the bulk single crystal growth of β-Ga₂O₃: from 1964 to 2024", *Cryst. Res. Technol.* 60 (2025) 2400255.
- [14] Y. He, Y. Liu, X. Chen and J. Ye, "Epitaxial growth of Ga₂O₃: A review", *Crystals* 14 (2024) 732.
- [15] R.K. Gupta, P.K. Sahoo and A. Kumar, "Tailoring Ga₂O₃ for solar-blind UV photodetectors: A comprehensive review of materials, techniques, and applications", *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 165 (2026) 100872.
- [16] A.L. Patterson, "The Scherrer formula for X-ray particle size determination", *Phys. Rev.* 56 (1939) 978.