

## Low temperature growth of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on Si substrates by MOCVD and their electrical characteristics

Jung Bok Lee, Nam Jun Ahn, Hyung Soo Ahn, Kyung Hwa Kim and Min Yang<sup>†</sup>

Department of Materials Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received March 18, 2022)

(Revised March 31, 2022)

(Accepted April 8, 2022)

**Abstract** Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films were grown on n-type Si substrates at various growth temperatures of 500, 550, 600, 650 and 700°C. The Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films grown at 500°C and 550°C were characterized as featureless flat surface. Grown at higher temperatures (600, 650, and 700°C) showed very rough surface morphology. To figure out the annealing effect on the thin films grown at relatively low temperatures (500, 550, 600, 650 and 700°C), the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films were thermally treated at 900°C for 10 minutes. Crystal structure of the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown at 500 and 550°C were changed from amorphous to polycrystalline structure with flat surface. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film grown at 550°C was chosen for the fabrication of a Schottky barrier diode (SBD). Electrical properties of the SBDs depend on the thermal treatment were evaluated. A MSM type photodetector was made on the low temperature grown Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film. The photocurrent for the illumination of 266 nm wavelength showed 5.32 times higher than dark current at the operating voltage of 10 V.

**Key words** Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MOCVD, Si, Schottky Barrier Diode (SBD), MSM (metal-semiconductor-metal) photodetector

## MOCVD에 의한 Si 기판 위의 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 저온 결정 성장과 전기적 특성

이정복, 안남준, 안형수, 김경화, 양민<sup>†</sup>

한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

(2022년 3월 18일 접수)

(2022년 3월 31일 심사완료)

(2022년 4월 8일 게재확정)

**요약** 유기금속 화학 증착 방법(MOCVD)을 사용하여 Si 기판 위에 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막들을 다양한 성장 온도에서 형성하였다. 성장 온도 500°C와 550°C에서 성장한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막들은 매우 깨끗하고 평평한 표면 상태를 보였으며, 결정구조는 비정질 상태를 확인할 수 있었다. 성장한 박막들의 열처리 효과를 확인하기 위하여 각각의 박막들은 900°C 온도에서 10분간 열처리를 수행하였다. 성장 온도 500°C와 550°C에서 성장한 박막들은 초기의 평평한 표면 상태는 그대로 유지하면서 결정 구조가 비정질에서 다결정으로 변한 것을 확인할 수 있었다. 쇼트키 다이오드를 제작하기 위한 박막으로는 550°C에서 성장한 박막을 선택하였는데, 이는 소자의 제작 및 성능을 향상하기 위해서는 평평한 표면 위에서의 공정이 필수적이기 때문이다. 또한, 열처리 효과를 확인하기 위하여 900°C에서 열처리를 실시한 박막을 이용하여 동일한 형태의 쇼트키 다이오드를 제작하여 특성을 비교하였다. 또한 박막의 광소자로의 응용 가능성을 확인하기 위하여 MSM(metal-semiconductor-metal) 광검출기를 제작한 결과 266 nm 자외선 파장의 빛에 대응하는 광전류(동작 전압 10 V)는 암전류 대비 약 5.32배 증가함을 보이는 것을 확인하였다.

### 1. 서론

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 넓은 밴드갭을 지닌 반전도성 삼이산화물 (sesquioxide)으로써 물리적 특성과 구조가 다른 α-, β-, γ-, δ-, ε- 결정상이 존재한다[1]. 모든 상의 결정구조와 Ga 원자에 대한 이온 배위수가 다르다. CVD 방법으로는 α-,

β-, ε- 상만이 성장 가능하며, 다섯 가지 상 중 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 자연계에서 가장 안정한 상이고, 이로 인하여 가장 많이 연구된 상이기도 하다[2]. 단사정계(monoclinic) 구조를 가진 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 4.9 eV에 달하는 밴드갭과 큰 임계 전기장(8 MV/cm) 그리고 높은 열적, 화학적 안정성, 큰 항복전압, 높은 유전상수를 가지고 있기 때문에 심자외선 영역(deep UV)의 광-검출기(photo-detector), 광다이오드(photo-diode)와 같은 광소자로도 주목받고 있다[3-7]. 하지만, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 단점 중에 하나인 낮은 방열 문

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: myang@kmou.ac.kr

체를 해결하기 위해 열전도율이 높은 기판과의 접합 구조에 대한 연구가 필수적이다. 또한, 고성능 이중 접합 소자에 대한 수요가 증가함에 따라 효율적인 이중 박막 성장(hetero-epitaxy) 기술이 여전히 요구되고 있다. 따라서 Si 기판의 열전도와 높은 완성도의 상용 기판 위에 고품질의 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 성장시키는 기술의 개발은 매우 중요하다. Si에 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 박막 성장 기술을 응용하게 되면 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 방열 문제를 해결함과 동시에 미래의 차세대 전력반도체 기술로 발전시킬 수 있다. 하지만 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막과 입방정계(cubic) 구조의 Si 기판 사이의 격자부정합 차이로 인해 표면이 매끄러운 고품질의 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 성장시키는 것은 쉽지 않다[8-12]. 따라서 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 성장 온도의 변화를 이용하여 평탄하고 매끄러운 박막성장의 온도를 확보하기 위해 500, 550, 600, 650 그리고 700°C 온도에서 박막을 성장시켜 비교하였고, 실험을 통해 500°C, 550°C에서 성장하였을 경우 박막이 비교적 매끈하고 평탄한 것으로 관찰되었다. 또한, 박막에 대한 열처리 효과를 확인하기 위하여 900°C 열처리하였을 경우의 특성에 대해서도 알아보았다. 본 연구에서는 성장 온도에 초점을 맞추어 실험을 진행하였으며, 유기 금속 화학 증착법(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)을 이용해 Si 위에 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 성장하여 결정 성장 온도에 따른 비정질, ε-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정상과 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정상의 변화를 확인하였다. 또한, 표면 평탄도가 양호한 550°C에서 성장한 박막을 이용하여 열처리 유무에 따른 쇼트키 다이오드의 특성을 비교하였다. TLM(transition line model) 패턴을 이용하여 박막의 면저항을 측정하였고, 266 nm 자외선 파장의 빛에 대한 광전류 특성을 함께 확인하였다.

## 2. 실험 방법

기판으로 사용된 n-type Si 기판의 표면에 존재하는 유기물을 제거하기 위하여 아세톤과 메탄올을 각각 사용하여 2분 동안 초음파 세척을 실시하였다. 유기 세척이 완료된 기판 표면의 자연산화막(SiO<sub>2</sub>)을 제거하기 위하여 불화수소(HF)와 탈이온수(DI water)를 1:10의 비율로 섞어 2분간 표면 에칭을 실시하였다. 탈 이온수로 세척한 후, 초고순도 질소 가스로 건조한 기판은 곧바로 서셉터에 장착하였다. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성장에 사용한 MOCVD는 직접 제작한 수평형 형태로서 RF 가열 방식을 이용하여 기판이 장착된 서셉터의 온도를 조절하였다. Ga 원자 공급을 위한 전구체로는 trimethylgallium(TMg)을 사용하였고, 산소원자를 공급하기 위해서는 탈이온수를 초고순도(6N) 질소 가스로 버블링하여 공급하였다. TMg 원료를 버블링 및 반응관으로 수송하기 위한 캐리어 가스 및 반응관

내부의 원료를 희석하기 위한 캐리어 가스도 역시 초고순도(6N) 질소 가스를 사용하였다. TMG 항온조의 온도는 -10°C로 유지하였고 H<sub>2</sub>O 버블러는 상온으로 유지하였다. 박막 성장 시 TMG를 통과하는 캐리어 가스의 유량은 7 sccm(17.05 μmol/min), 산소 유량은 450 cc으로 유지하였으며, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 성장 온도는 500, 550, 600, 650 그리고 700°C로서 성장 온도에 변화를 주었다. 반응관의 압력은 1기압으로 유지하였고 각각의 온도에서 박막 성장 시간은 30분으로 일정하게 하였다. 또한, 각 박막들의 열처리 효과를 알아보기 위하여 위에서 언급한 각각의 조건으로 동일하게 성장시킨 박막들을 900°C 온도에서 10분간 열처리를 실시하고, 박막의 특성들을 열처리 유무에 따라서 비교하였다. 열처리 과정 동안 산소 원자를 공급하기 위하여 탈이온수를 질소 가스로 버블링 시키면서 분위기 가스를 공급하였다. 성장이 끝난 뒤에는 TMG 소스의 공급을 중단하고 산소 공공(oxygen vacancy) 형성을 최소화하기 위해 상온으로 온도를 내릴 때까지 H<sub>2</sub>O 소스를 공급해주었다. 성장이 완료된 박막들은 박막의 형성 조건에 따른 전기적 특성을 비교하기 위하여 수직형 쇼트키 다이오드 제작에 활용되었다. 수직형 쇼트키 다이오드 제작을 위해 열 증착기(thermal evaporator)를 사용하여 Si 기판 뒷면에 Al 전극을 100 nm 증착한 후 질소분위기에서 열처리(500°C, 10분)를 실시하여 오믹 접촉을 형성하였다. 오믹 접촉이 완성된 시료의 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 위에 쇼트키 전극의 형성을 위하여 진공 박막 증착기(e-beam evaporator)를 이용하여 Ti/Au(25/50 nm) 금속 박막을 증착하였다. 또한, 박막의 면저항 특성을 확인하기 위하여 박막 위에 TLM(transition line model) 패턴을 형성하였다. 전극으로는 Ti/Au(25/50 nm) 전극을 이용하였으며, 오믹 접촉 형성을 위해 500°C에서 10분간 열처리를 실시하였다. 한편, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 광소자로의 응용 가능성을 확인하기 위하여 자외선(266 nm)에 대한 광전류 특성을 분석하였는데, 이를 위해서 앞에서 언급한 TLM 패턴의 두 전극을 MSM(metal-semiconductor-metal) 광검출기 구조로 활용하였다. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막들의 구조적 및 결정학적 특성은 Rigaku 사의 Smart Lab X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD), TESCAN 사의 MIRA-3 전계 방출 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM), AFM(atomic force microscope, AFM)을 이용하여 분석하였으며, 전기적 특성을 분석하기 위해서 MSTECH 사의 probe station을 이용하여 I-V 특성 분석을 실시하였다.

## 3. 결과 및 토론

Figure 1에 500~700°C의 온도 범위에서 성장시킨 박

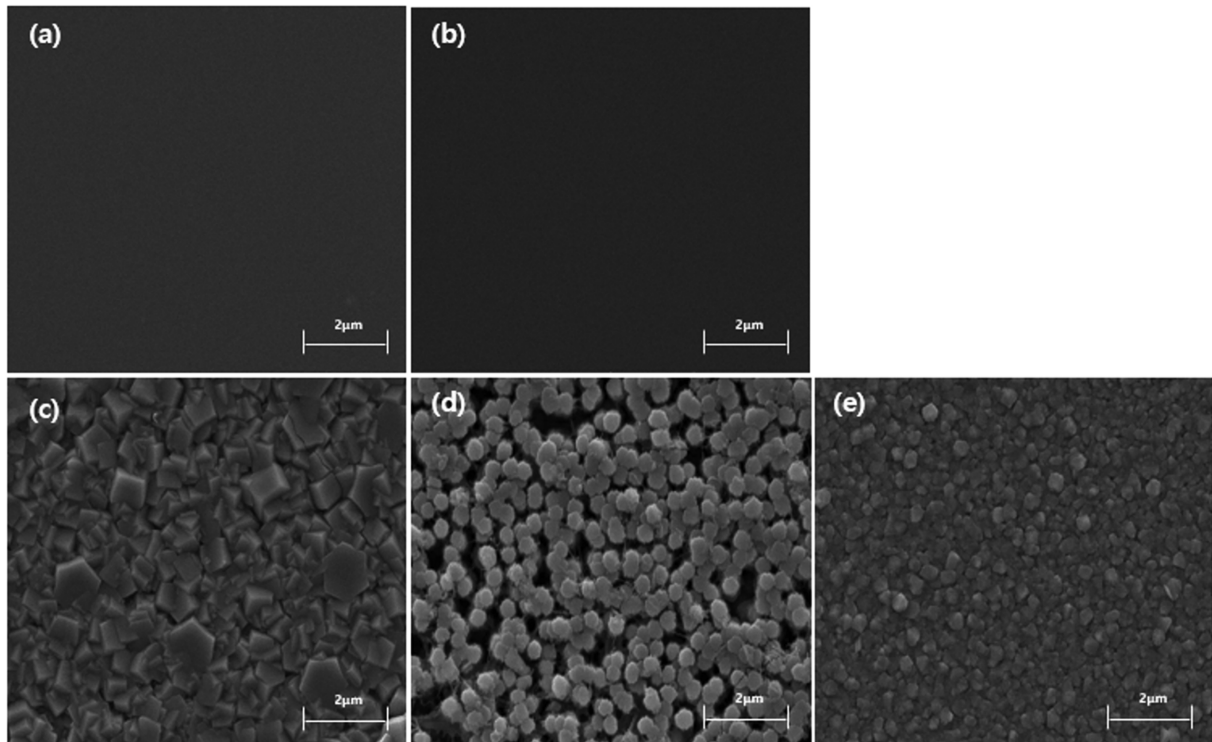


Fig. 1. SEM images of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films grown at temperatures of (a) 500°C, (b) 550°C, (c) 600°C, (d) 650°C and (e) 700°C.

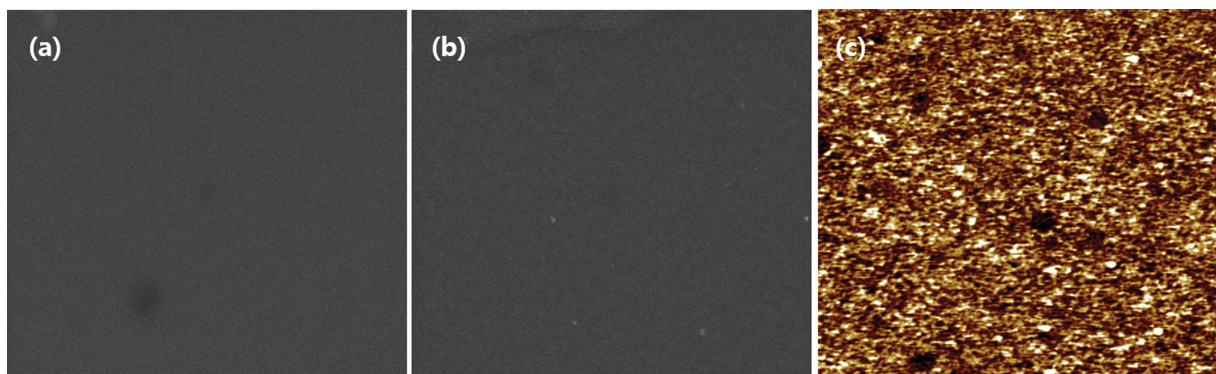


Fig. 2. SEM images of surface state of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films after thermal treatment at 900°C correspond to the initial growth temperatures of (a) 500°C, (b) 550°C. (c) AFM image for the case of 550°C grown film after 900°C annealing.

막들의 표면 형상 모습을 보였다. 성장 온도가 500°C와 550°C인 경우(Fig. 1의 (a), (b)) 매우 매끄러운 상태의 평평한 표면 모습을 확인할 수 있다. 나중에 언급하게 될 XRD의 결과에서도 확인할 수 있는 바와 같이 이 온도 범위에서는 결정화에 필요한 활성화 에너지가 부족하여 비정질 상태로 박막이 형성되는 것으로 판단된다. 한편, 성장 온도가 600, 650 그리고 700°C인 경우(Fig. 1의 (c), (d), (e))에는 다결정 형태의 거친 박막 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 600°C, 650°C 그리고 700°C 성장 온도에 대응하는 박막들의 평균 입자 크기는 각각 1 μm, 0.17 μm 그리고 0.3 μm의 결과를 보였다. Figure 2에는 500°C와 550°C에서 성장한 박막을 산소분위기에서

900°C, 10분간 열처리 한 박막들의 표면에 대한 SEM 사진(Fig. 2(a), (b))과 AFM 결과(Fig. 2(c))를 보이고 있다. SEM 사진에서 확인할 수 있는 바와 같이 500°C와 550°C에서 성장한 박막들은 900°C 열처리 후에도 평탄한 표면 상태를 그대로 유지하는 것을 확인할 수 있다. 550°C에서 성장한 박막의 열처리 전후 박막 표면의 거칠기를 확인하기 위하여 AFM(atomic force microscope) 분석을 실시한 결과 열처리 전과 후의 root-mean-square (RMS) 표면 거칠기가 1.4 nm으로 확인되었으며, 이 결과로부터 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 저온에서 성장하고 열처리를 과정을 이용하면, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 매끄러운 평탄도를 유지하면서 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 결정학적 특성에 변화를 줄 수 있

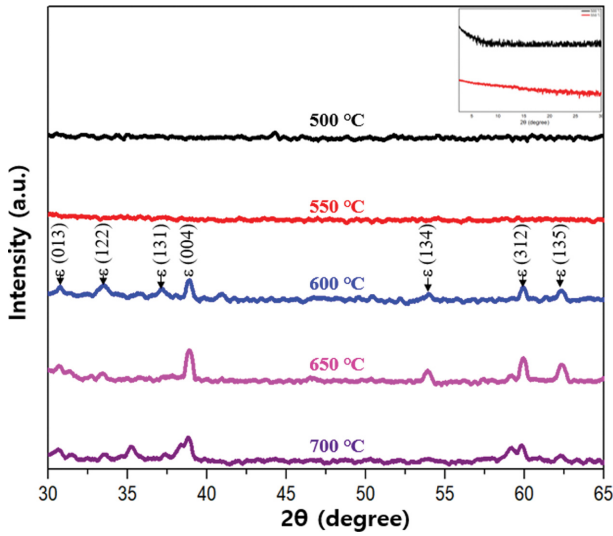


Fig. 3. XRD spectra of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films grown at temperatures of 500, 550, 600, 650 and 700 °C. Insertion shows spectra of the thin films grown at 500, 550 °C measured with GI-XRD mode.

음을 확인할 수 있다. Figure 3에는 성장 온도에 따른 결정상의 변화를 관찰하기 위해 각 온도 별로(500, 550, 600, 650, 700 °C) 성장한 샘플의 XRD( $2\theta$ - $\omega$  scan) 스펙트럼들을 나타내었다. X-선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD) 결과로부터 500 °C, 550 °C에서 성장한 샘플은 낮은 각(low angle,  $0^\circ$ ~ $30^\circ$ )에서도 비정질로 형성되었음을 확인할 수 있으며, 600 °C 이상에서 성장한 박막들은  $\epsilon$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 으로 성장되는 것을 확인하였다. 600 °C, 650 °C 샘플에서 확인되는 우선 성장 방향으로는  $\epsilon$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 (013), (122), (131), (004), (134), (312), (135) 면들로 확인되었다. 한편 700 °C에서는  $\epsilon$ -(134) 결정면이 거의 사라지

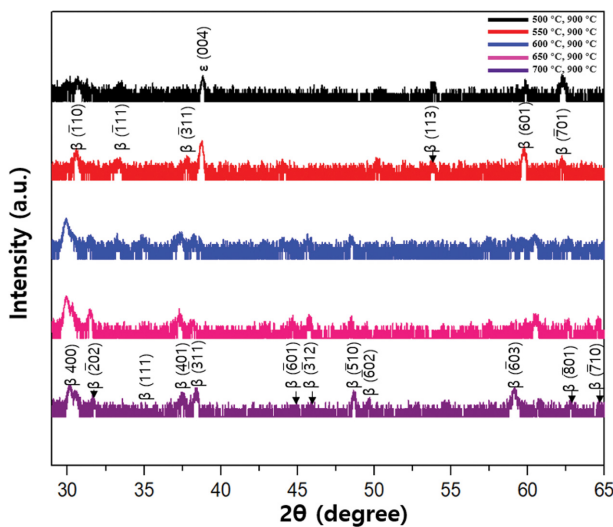


Fig. 4. XRD results after thermal treatment at 900 °C for the  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films grown at 500, 550, 600, 650 and 700 °C.

는 특징을 보이고 있다.

Figure 4에는 500~700 °C 온도 범위에서 성장시킨 박막들을 900 °C에서 열처리를 실시한 후의 결정상의 변화를 관찰하기 위해 측정된 XRD 스펙트럼들을 나타내었다. 500 °C와 550 °C에서 성장한 박막들은 900 °C 열처리 후 비정질에서 다결정으로 변화하는 것을 확인하였으며,  $\epsilon$  결정상에 (004) 결정면, ( $\bar{1}10$ ), ( $\bar{1}11$ ), ( $\bar{3}11$ ), (113), (601) 그리고 ( $\bar{7}01$ ) 결정면들에 대응하는  $\beta$ -결정상이 주로 관찰되었다. Scherer 방정식을 이용하여 계산된 박막 내의 평균 입자 크기는 0.048  $\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 650 °C 샘플에서 확인되는 우선 성장 방향의 결정면들도  $\beta$  결정상을 가지고 있으며 (400), ( $\bar{2}02$ ), (111), (401), ( $\bar{3}11$ ), (601), (312), ( $\bar{5}10$ ), ( $\bar{6}02$ ), (801) 그리고 ( $\bar{7}10$ ) 결정면들에 대응하는 피크가 관찰되었으며, 700 °C에서 성장한 박막의 경우에는  $\beta$ -( $\bar{6}03$ ) 피크가 추가로 확인되었다.

SEM 분석에서 600 °C 이상의 성장 온도에서 성장된 시료의 표면이 거칠고 매끄럽지 않은 것을 확인하였다. 소자 제작을 위해서는 매끈하고 평평한 박막이 필수적이므로 본 실험에서는 평평한 표면을 가지는 550 °C에서 성장한 박막에 대해 열처리 전과 후의 전기적 특성의 변화를 확인하기 위하여 각각의 박막을 이용하여 쇼트키 다이오드를 제작하여 전류-전압 관계를 조사하였다. 쇼트키 다이오드를 제작하기 위하여 Si 기판 뒷면에는 Al을 증착하고 열처리를 공정으로 오믹 전극을 형성하였으며,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막 표면에는 Ti/Au를 증착하여 쇼트키 전극을 형성하였다. 전압-전류밀도 관계를 Fig. 5에 보였다. 열처리를 실시하지 않은 쇼트키 다이오드는 built-in 전압이 약 2 V 정도임을 알 수 있는데, 일반적인 쇼트키 다이오드와 비교했을 때 [13,14] built-in 전압이 약간 큰 값을 가지는 것을 보여주고 있다. 550 °C에서 성장한

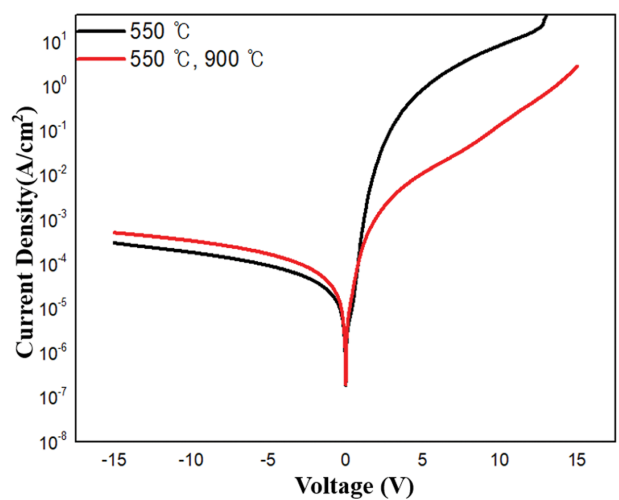


Fig. 5. J-V characteristics of Schottky diodes for the  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films grown at 550 °C. Before thermal treatment at 900 °C (black solid line), after thermal treatment (red solid line).

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 경우 결정상이 비정질 형태이기 때문에 일반적인 다이오드와는 전기적 전도 메커니즘이 차이가 있으며, 결정 성장 중에 Si 기판 표면에 자연적으로 형성되는 자연산화막의 영향이 전자에 대한 추가적인 포텐셜 장벽을 형성하여 built-in 전압이 약간 증가한 것으로 추측된다. 역방향포화 전류밀도는 두 종류의 소자 모두 전압에 대해 일정한 비율로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 900°C 열처리 한 소자가 열처리하지 않은 소자에 비해 약 1.84배 큰 값을 보이고 있다. 한편, 순방향 전류밀도는 900°C 열처리 한 소자가 열처리하지 않은 소자에 비해 약 93 배 정도 낮은 값의 전류밀도를 보이고 있다. 900°C 열처리 한 소자의 역방향 포화전류 밀도 값이 비교적 큰 값을 고려하더라도 순방향 전류밀도의 증가 비율은 열처리하지 않은 소자에 비교할 때, 비정상적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이에 대한 가능한 원인을 파악하기 위하여 TLM 방법을 이용하여 900°C에서 열처리 한 박막의 접촉 비저항 값을 확인한 결과,  $\rho_c = 1.96 \times 10^4 \Omega\text{-cm}^2$ 으로 확인되었다. 이 결과는 일반적인 값[15]에 비하여 매우 큰 값으로서 아마도 이러한 큰 값의 접촉 비저항이 비정상적으로 낮은 전류밀도 증가율에 기여했을 가능성이 있을 것으로 추측된다. 또한, 접촉 비저항의 증가 이외에도 (1) 열처리 과정에서 박막의 산소 공공(oxygen vacancy)의 밀도 감소, (2) 박막의 표면 산화, (3) 결정상이 비정질에서 다결정으로 변화하면서 전자 트랩으로 작용하는 결정립 경계(grain boundary) 밀도 증가, (4) Si과 박막 경계면에서의 결합 상태 밀도 변화 등 다양한 원인들이 비정상적인 전류밀도 증가율에 기여할 수 있었을 것으로 추측할 수 있다. 그렇지만 보다 정확한 원인에 대해서는 체계적인 연구들이 더 필요할 것으로

생각한다. 한편, Si 기판 위에 형성된 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 광-검출기로서의 가능성을 확인하기 위하여 900°C에서 열처리한 박막을 이용하여 MSM형태의 광-검출기를 제작하였다. Figure 6에 MSM 광-검출기의 전압-전류 특성을 보였다. 광전자를 형성하기 위해 사용한 광원은 중심 파장이 266 nm인 펄스형 레이저를 사용하였는데 펄스 폭은 0.5 ns, 평균 출력은 8.12 mW이다. 동작전압 10 V에서 빛을 조사하지 않은 암전류에 대한 광전류는 약 5.32 배의 비율로 증가함을 확인하였으며, 광응답도는  $3.4[A/W\text{-cm}^2]$ 로 계산되었다. 박막 성장 조건 최적화를 통해 고품질의 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 Si 기판 위에 형성하게 된다면, Si 반도체의 잘 정립된 기술과 접목하여 다양한 기능과 고성능의 solar-blind UV 영역에 대응하는 광-전 소자의 제작에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

고기능을 가지는 소자 제작으로의 가능성을 위하여 Si 기판 위에 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 다결정 박막으로 성장하였다. XRD와 SEM 분석 결과 성장 온도 500°C와 550°C에서 성장한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막들은 매우 깨끗하고 평평한 표면 상태를 보였으며, 결정구조는 비정질 상태임을 확인할 수 있었다. 그에 반해서, 600, 650 그리고 700°C에서 성장한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막들은 표면이 거칠고 다결정체로 구성되어 있음을 뚜렷하게 보여주고 있다. 상대적으로 낮은 온도(500, 550, 600, 650, 700°C)에서 성장한 박막들의 열처리 효과를 확인하기 위하여 각각의 박막들은 900°C 온도에서 10분간 열처리를 수행하였다. 성장 온도 500°C와 550°C에서 성장한 박막들은 초기의 평평한 표면 상태는 그대로 유지하면서 결정 구조가 비정질에서 다결정으로 변한 것을 확인할 수 있었다. 표면 평탄도가 양호한 550°C에서 성장한 박막을 이용하여 열처리 유무에 따른 쇼트키 다이오드의 I-V특성을 비교한 결과 900°C 열처리 한 소자의 순방향 전류밀도의 증가 비율은 열처리하지 않은 소자에 비교할 때, 비정상적으로 낮은 것을 확인하였다. 또한 MSM 광-검출기를 제작하여 광전류 특성을 평가한 결과 266 nm 자외선 파장의 빛에 대응하는 광전류(동작 전압 10 V)는 암전류 대비 약 5.32배 증가함을 보이는 것을 확인하였다.

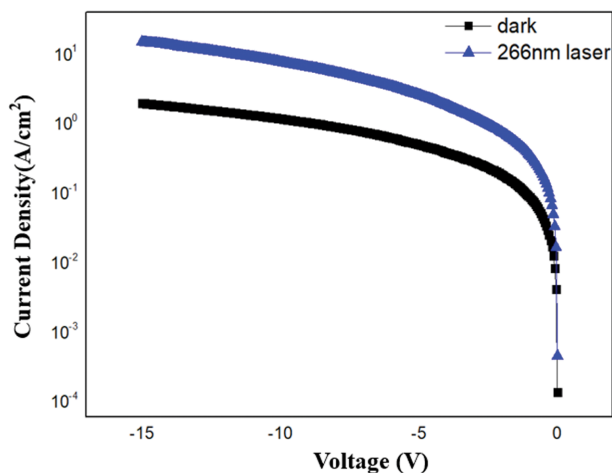


Fig. 6. Photo-current density characteristics of the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film grown at 550°C and followed by 900°C annealing. Dark condition (black square) and photo-current density (blue triangle). Light source is 266 nm pulsed laser (pulse width: 0.5 ns, average power: 8.12 mW).

#### 감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012451, 2021년 산업전문인력역량강화사업).

## References

- [ 1 ] R. Roy, V. Hill and E. Osborn, "Polymorphism of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  and the system  $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ ", *J. Am. Chem. Soc.* 74 (1952) 719.
- [ 2 ] Y. Li, A. Trinchì, W. Włodarski, K. Galatsis and K. Kalantar-zadeh, "Investigation of the oxygen gas sensing performance of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films with different dopants", *Sensor. Actuat. B-chem.* 93 (2003) 431.
- [ 3 ] S. Geller, "Crystal structure of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ", *J. Chem. Phys.* 33 (1960) 676.
- [ 4 ] H. Tippins, "Optical absorption and photoconductivity in the band edge of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ", *Phys. Rev.* 140 (1965) A316.
- [ 5 ] M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Recent progress in  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  power devices", *Semicond Sci Technol.* 31 (2016) 034001.
- [ 6 ] K. Sasaki, D. Wakimoto, Q. Thieu, Y. Koishikawa, A. Kuramata, M. Higashiwaki and S. Yamakoshi, "First demonstration of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  trench MOS-type schottky barrier diodes", *IEEE Electron Device Lett.* 38 (2017) 783.
- [ 7 ] Y. Kokubun, K. Miura, F. Endo and S. Nakagomi, "Sol-gel prepared  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  thin films for ultraviolet photodetectors", *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 031912.
- [ 8 ] N. Ueda, H. Hosono, R. Waseda and H. Kawazoe, "Synthesis and control of conductivity of ultraviolet transmitting  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals", *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 3561.
- [ 9 ] S. Rafique, L. Han, M.J. Tadjer, J.A. Freitas, N.A. Mahadik and H. Zhao, "Homoepitaxial growth of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  thin films by low pressure chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) 182105.
- [10] D. Gogova, M. Schmidbauer and A. Kwasniewski, "Homo- and heteroepitaxial growth of Sn-doped  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  layers by MOVPE", *CrystEngComm* (2017) 6744.
- [11] F. Boschi, M. Bosi, T. Berzina, E. Buffagni, C. Ferrari and R. Fornari, "Hetero-epitaxy of  $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$  layers by MOCVD and ALD", *J. Cryst. Growth.* 443 (2016) 25.
- [12] Y. Oshima, E.G. Víllora, Y. Matsushita, S. Yamamoto and K. Shimamura, "Epitaxial growth of phase-pure  $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$  by halide vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* 118 (2015) 085301.
- [13] K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi and M. Higashiwaki, "1-kV vertical  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  field-plated Schottky barrier diodes", *Appl. Phys. Lett.* 110 (2017) 1103506.
- [14] P.H. Carey IV, J. Yang, F. Ren, R. Sharma, M. Law and S.J. Pearton, "Comparison of dual-stack dielectric field plates on  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  schottky rectifiers", *ECS J. Solid State Sci. Technol.* (2019) Q3221.
- [15] P.N. Vinod, B.C. Chakravarty, M. Lal, R. Kumar and S.N. Singh, "A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells", *Semicond. Sci. Technol.* (2020) 286.