

산소 후열처리에 따른 Ga₂O₃/SiC photodetector의 전기 광학적 특성

Impact of Oxygen Annealing on Deep-level Traps in Ga₂O₃/SiC Photodetectors

정승환*, 이태희*, 문수영*, 박세림*, 이형진*, 이건희*, 구상모**★

Seung-Hwan Chung*, Tae-Hee Lee*, Soo-Young Moon*, Se-Rim Park*, Hyung-Jin Lee*,
Geon-Hee Lee*, Sang-Mo Koo**★

Abstract

In this work, we investigated the role of oxygen annealing on the performance of Metal-Semiconductor-Metal (MSM) UV photodetector (PD) fabricated by radio frequency (RF)-sputtered Ga₂O₃ films on SiC substrates. Oxygen-annealed Ga₂O₃ films displayed a notable increase in photocurrent and a faster decay time, indicating a decrease in persistent photoconductivity. This improvement is attributed to the reduction of oxygen vacancies and variation of defects by oxygen post-annealing. Our findings provide valuable insights into enhancing PD performance through oxygen annealing.

요약

본 연구에서는 radio frequency (RF)-스퍼터링을 이용하여 SiC 기판 위에 Ga₂O₃ 박막을 증착하여 Metal-Semiconductor-Metal (MSM) UV photodetector (PD)를 제작하였고, 산소 후열처리에 따른 PD 성능을 연구하였다. 산소 후열처리된 Ga₂O₃ 박막은 외부 광에 대한 전류의 상당한 증가와 시간 의존성 on/off 광 응답 특성에서 측정된 감소시간이 1.21, 1.12 s로 후열처리를 하지 않은 박막의 감소시간인 1.34, 3.01 s 보다 더 빠른 반응을 보여주었다. 이러한 특성은 산소 후열처리 후의 산소 공공 및 결함 분포 변화에 기인한다. 우리의 연구 결과는 산소 후열처리가 PD 성능 향상에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다.

Key words : Gallium Oxide, MSM photodetector, Persistent current, Oxygen vacancy, Deep level defects

* Dept. of Electronic materials Engineering,
Kwangwoon University(Researcher, Professor)

★ Corresponding author
E-mail : smkoo@kw.ac.kr, Tel : +82-2-940-5763

※ Acknowledgment

This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) (P0012451), the National Research Foundation (NRF) funded by the Korea government(MSIT)(2021R1F1A1057620), and a research grant from Kwangwoon university in 2023.

Manuscript received Aug. 25, 2023; revised Sep. 18, 2023; accepted Sep. 26, 2023.

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.

1. 서론

최근에는 와이드 밴드갭 물질인 산화갈륨(Ga₂O₃), 질화갈륨(GaN), 탄화규소(SiC)가 실리콘 대비 고온, 고주파, 고전력용 소자에 대해 적용이 가능한 물질로 많은 연구와 응용이 크게 주목 받고 있다[1]. 그 중에서도 Ga₂O₃는 4.9 eV 밴드갭, 8 MV/cm의 임계 전압과 같은 우수한 특성으로 차세대 전력반도체로 주목받고 있다[2-3]. 또한, direct 밴드 구조와 넓은 밴드갭으로 인해 심자외선(UV) 영역의 photo diode, photodetector 같은 광소자로도 주목을 받고 있다[4]. 하지만 Ga₂O₃의 열전도율(0.2 W/cm·K)은 실리콘(Si)에 비해 매우 낮은 값을 가진다. 이는 소자의 전기적 성능 저하의 주요 원인 중

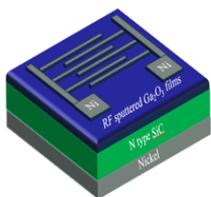
하나로 작용한다. 이 문제점은 높은 열전도율을 가진 다른 물질과의 이종접합을 통해 개선될 수 있다. SiC는 높은 열전도율(4.6 W/cm·K)을 보이므로, Ga₂O₃와 이종접합을 이루어 열전도율을 개선시킬 수 있다[5].

Ga₂O₃ 물질의 장점들과 Ga₂O₃을 기반으로 한 MSM 구조의 PDs는 간단한 제조 과정 때문에 크게 연구되고 있다. 그렇지만, 와이드 밴드갭 물질의 특성상 물질 내에 의도하지 않은 결함이 존재한다. 이러한 결함들은 carrier를 포획함으로써 minority carrier의 수명을 감소시키고 또한 누설 전류를 증가시키는 등 소자 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 결함에 대해 이해하는 것은 매우 중요하다. 결함의 성질과 그에 따른 영향을 연구하기 위해, deep level transient spectroscopy (DLTS), deep level optical spectroscopy (DLOS), thermally stimulated depolarization current (TSDC)와 같은 다양한 방법이 활용되어 왔다[6-8]. 이 외에도 PDs의 성능을 더욱 향상시키기 위한 다양한 방법들이 탐구되고 있다. 특히 Ga₂O₃ PDs에서는 산소 공공과 관련된 지속적인 광전도 효과가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이를 극복하기 위해, 산소 공공을 줄이는 것은 Ga₂O₃ PDs의 응답속도를 향상 시키는데 중요하며, 이를 위해서 산소 분위기에서 후열처리를 진행하는 것이 효과적인 방법으로 제시되고 있다[9].

본 연구에서는 RF sputtering을 이용해 SiC 기판위에 Ga₂O₃ 박막을 성장시켰고, 산소 후열처리에 따른 Ga₂O₃ 박막의 재료적 성질을 분석하였다. 그리고 산소 후열처리 전후의 Ga₂O₃ 박막 위에 interdigitated 전극을 형성하여 MSM 구조를 형성하였고, 256 nm의 심자외선 광원에 대한 전기적인 특성을 분석하였다.

II. 본론

1. 실험방법



- **Starting material**
 - N-type 4H-SiC substrate
- **Back metal deposition**
 - Nickel: 120 nm [E-beam evaporator]
 - 950°C, 90 s, N₂ ambient annealing for ohmic contact [RTA]
- **Thin films deposition**
 - Ga₂O₃ film: 400 nm [RF sputtering]
- **Annealing condition**
 - 950°C, 60 min, O₂ ambient annealing [Tube furnace]
- **Top metal deposition**
 - Using shadow mask
 - Nickel: 100 nm [E-beam evaporator]

Fig. 1. Structure and condition of Ga₂O₃/SiC photodetector.
그림 1. Ga₂O₃/SiC photodetector의 구조와 제작 조건

Fig 1.은 Ga₂O₃/SiC MSM PD의 구조를 보여준다. 이 소자는 N-type SiC 웨이퍼(base substrate : N_D=1×10¹⁹ cm⁻³, n-type epi layer : N_D=5×10¹⁶ cm⁻³) 기판을 사용하여 제작하였다. 기판 cleaning 작업을 위해 Radio Corporation of America(RCA) 및 과산화수소(H₂O₂)와 황산(H₂SO₄)을 1:4로 혼합한 용액으로 기판 cleaning 작업을 수행하였다. 이후 buffered oxide etch(BOE) 용액을 사용하여 자연적으로 생긴 SiO₂ 산화막을 제거하였다. 이후 후면 음극을 형성하기 위하여 E-beam evaporation 장비를 사용하여 150 nm 두께의 니켈(Nickel) 전극을 증착하였다. 후면 전극과 소자의 MS 접합을 ohmic화를 위해 1050 °C, N₂ 분위기에서 90 초(s) 동안 rapid thermal annealing (RTA)를 진행하였다. 그 후 SiC 기판위에 RF sputtering을 사용하여 Ga₂O₃ 박막을 증착했다. RF sputtering 증착 조건은 플라즈마를 형성하기 위하여 Ar 가스를 챔버에 주입했고, 증착이 진행되는 동안 챔버 내부의 기압은 25 mTorr의 입력으로 유지하였으며 RF의 전력은 120 W로 400 nm의 Ga₂O₃ 박막을 증착하였다. 증착된 Ga₂O₃의 박막을 Tube furnace를 이용하여 950 °C에서 60 분(min) 동안 열처리를 하였다. 이후 상부 양극을 증착하기 위해 E-beam evaporation 증착장비를 사용하였고, shadow mask를 사용하여 100 nm의 interdigitated 니켈 전극을 증착하여 MSM PD 소자를 제작하였다.

MSM PD를 제작하기 전, Ga₂O₃ 박막의 재료적 특성을 확인하기 위해 자외선 및 가시선 분광분석법(UV-visible spectrophotometer)을 사용하여 산소 후열처리 전과 후 박막의 투과 스펙트럼을 분석하였고, 이를 통해 박막의 bandgap을 추출하였다. 또한 X-선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)을 사용하여 산소 후열처리에 따른 Ga₂O₃ 박막내의 산소 공공(oxygen vacancy) 변화에 대해 분석하였고 깊은 준위 결함 분석(Depth level transient spectroscopy, DLTS)을 통해 산소 후열처리 후 박막 내의 결함 분포를 분석하였다. 이후에 재료적 분석이 완료된 박막에 위에 앞서 언급한 interdigitated 전극을 증착하였고, 256 nm 심자외선에 대한 전류-전압 특성과 전류-시간 분석을 통해 on/off 광 응답 특성을 확인하였다.

1. 결과 및 고찰

가. 재료적 성질

(1) UV-visible spectrophotometer

그림 2(a)는 산소 후열처리를 하지 않은 박막과 후열

처리를 진행한 박막의 투과 스펙트럼을 보여준다. 두 박막 모두 300 nm 파장의 빛은 모두 투과하는 특성을 보이지만, 후열처리를 진행하지 않은 박막이 후열처리를 진행한 박막보다 약 11% 더 높은 광학적 투과율을 나타낸다.

또한 그림 2(b)는 $(\alpha hv)^2$ 와 광자 에너지 hv 와의 관계를 나타낸 그래프이다. Tauc 관계식(1)을 통해 각 박막의 에너지 밴드갭을 구해줄 수 있는데, 여기서 α 는 흡수 계수로 $\ln(100/T)/d$ 로 주어지며, T는 Ga_2O_3 박막의 투과율이고 d는 필름의 두께를 의미한다[10]. 각 박막의 밴드갭은 그림 2(b)의 그래프에서 $(\alpha hv)^2$ 가 0이 될 때의 x절편으로 구할 수 있다. 식(1)을 통해, 후열처리 하지 않은 박막의 에너지 밴드갭은 5.02 eV, 후열처리를 진행한 박막의 에너지 밴드갭은 4.88 eV로 측정되었다. 이를 통해 산소 후열처리된 박막이 후열처리를 하지 않은 박막보다 작은 에너지 밴드갭을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

$$(\alpha hv)^2 = B(hv - E_g) \tag{1}$$

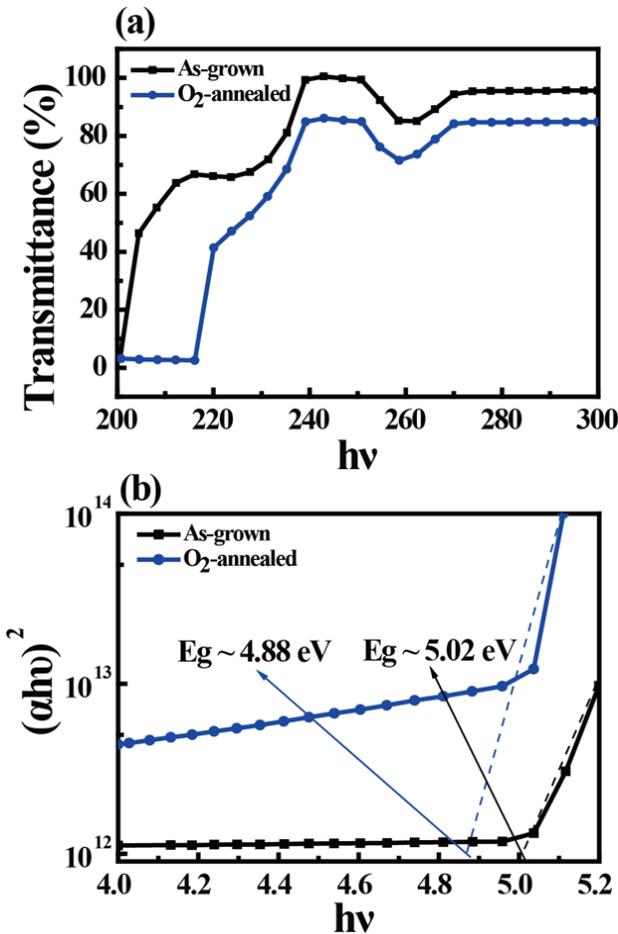


Fig. 2. (a) UV-visible transmittance spectrum of Ga_2O_3 film, (b) variation of $(\alpha hv)^2$ with photon energy (hv).
 그림 2. (a) Ga_2O_3 박막의 자외 및 가시선 분광분석 투과 스펙트럼, (b) 광자 에너지 hv 에 따른 $(\alpha hv)^2$ 의 변화

(2) X-ray Photoelectron Spectroscopy

그림 3은 산소 후열처리에 따른 박막의 화학적 결합 에너지 변화를 분석하기 위해 측정된 XPS 그래프이다. 측정을 통하여 얻어진 각 박막의 대한 O 1s peak 스펙트럼을 보여준다. XPS를 분석하기 위해 C 1s peak가 나타내는 281.6 eV의 결합 에너지를 기준으로 XPS 측정 결과를 calibration 하였다. 위 스펙트럼에서는 주로 Ga_2O_3 박막 내에 존재하는 두 종류의 산소 상태, 즉 산소 격자(oxygen lattice)와 산소 공공(oxygen vacancy)에 대한 두 개의 Gaussian 피크가 관찰되었다.

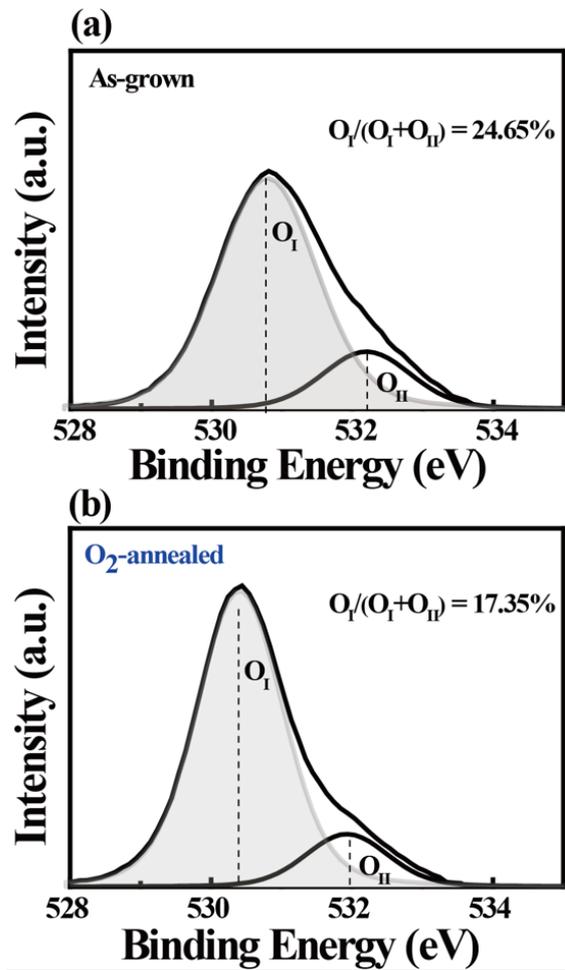


Fig. 3. XPS spectra of O 1s levels in (a) As-grown and (b) O_2 annealed Ga_2O_3 films.

그림 3. (a) 후열처리 하지 않은, (b) O_2 후열처리 된 Ga_2O_3 박막에서의 O 1s 레벨에 대한 XPS 스펙트럼

O 1s peak는 530.8, 532.2 eV의 결합에너지를 가지는 두 개의 피크로 구성되었으며, 스펙트럼에서 보여지는 두 피크 중, 상대적으로 낮은 결합 에너지를 가지는 피크는 Ga 원자와 결합된 O_2 -이온과 관련된 산소 격자와 관련이 있고, 상대적으로 높은 결합 에너지를 가지는

피크는 Ga₂O₃ 박막 내에서 발생하는 산소 공공과 연관되어 있다[11-12].

산소 후열처리 후에 O 1s peak 스펙트럼에서 산소 공공과 관련된 피크의 상대적인 비율 $O_{II}/(O_I+O_{II})$ 이 24.65 %에서 17.35 %로 감소하였다. 이러한 변화는 산소 후열처리 과정에서 박막 내의 산소 분자 수가 증가함에 따라, 결정 구조 내의 산소 공공 영역이 감소하였음을 의미한다. 이는 산소 후열처리 과정이 박막의 재료적 특성과 photodetector의 전기적 특성에 영향을 미칠 수 있다.

나. 전기적 성질

(1) 전류-전압 특성

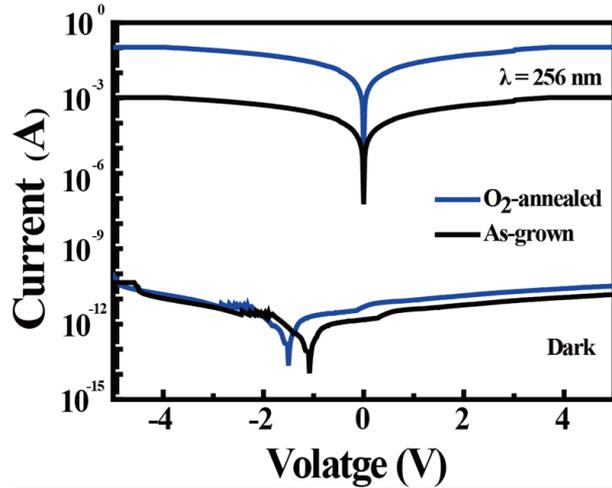


Fig. 4. I-V characteristics of Ga₂O₃/SiC photodetector on illumination of 256 nm light.

그림 4. 256 nm의 심자외선 빛을 조사했을 때의 Ga₂O₃/SiC photodetector의 I-V 특성

그림 4는 재료적 분석을 마친 Ga₂O₃ 박막에 전극을 증착하여 측정한 전류-전압 특성 그래프이다. 산소 후열처리 전후의 소자에서 광원이 없는 암전류와 256 nm 광원을 이용한 광전류를 각각 표시하였다. 산소 후열처리 전후 소자의 암전류에서는 큰 차이를 보이지 않았지만 256 nm 광원하에서 측정한 광전류에서는 산소 후열처리를 진행한 소자가 약 100배 더 높은 값을 나타냈다.

이를 기반으로 photodetector의 중요한 성능지표 파라미터인 photo to dark current ratio(PDCR)을 비교해보면, 산소 후열처리를 진행한 샘플은 1.15×10^9 , 후열처리를 진행하지 않은 샘플은 2.30×10^7 을 나타냈다. PDCR은 식(2)를 통해 계산되었다[13].

$$PDCR = \frac{I_p - I_d}{I_d} \quad (2)$$

여기서 I_p 는 광전류, I_d 는 암전류를 의미한다. 두 소자 모두 심자외선 빛에 대해 민감하게 반응했으나, 산소 후열처리된 소자의 PDCR 값이 약 50배 높게 나타난 것으로 보아 산소 후열처리가 photodetector의 성능 향상에 긍정적인 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

(2) 전류-시간 특성

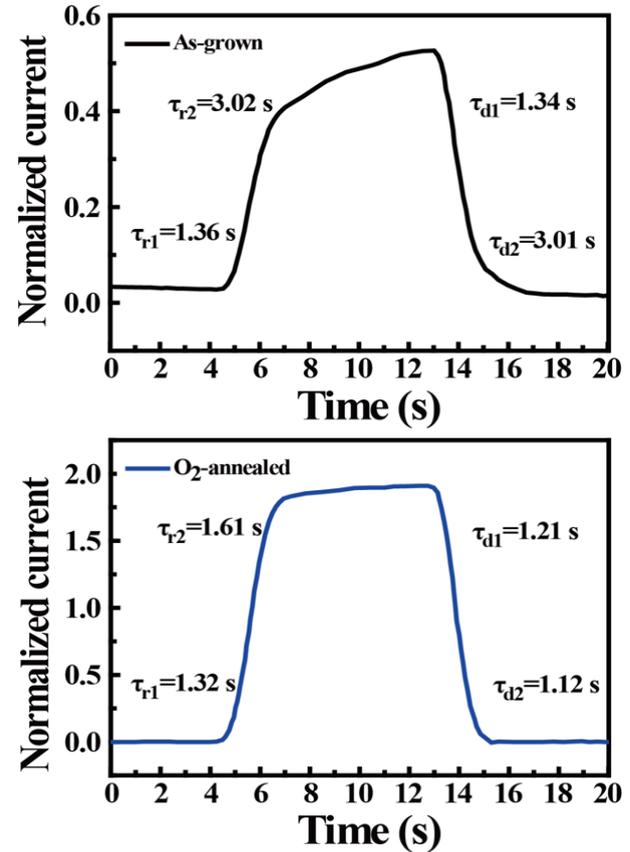


Fig. 5. Time dependence photo-response of light on/off switching characteristics in (a) As-grown and (b) O₂ annealed photodetectors.

그림 5. 빛의 on/off에 따른 (a) 후열처리 되지 않은, (b) 후열 처리된 photodetector의 광 응답 특성

그림 5는 산소 후열처리 전후 소자의 256 nm의 심자외선 빛에 대한 광 응답 특성 그래프를 보여준다. 이 그래프는 산소 후열처리에 따른 심자외선에 대한 응답속도 차이를 확인하기 위하여 측정되었다. 시간에 따른 광 응답 특성은 -5 V의 역전압을 가해준 상태로 256 nm 파장, 50 W/cm² 에너지 밀도를 가지는 광원 하에서 측정했다.

산소 후열처리를 하지 않은 소자의 상승 시간(τ_{r1} , τ_{r2})은 각각 1.36, 3.02 s로 측정되었고, 감소 시간(τ_{d1} , τ_{d2})은 각각 1.34, 3.01 s로 측정되었고, 산소 후열처리

된 소자의 상승 시간(τ_{r1} , τ_{r2})은 각각 1.32, 1.61 s로 측정되었고, 감소 시간(τ_{d1} , τ_{d2})은 각각 1.12, 1.21 s로 측정되었다. 이는 식(3)의 관계를 따른다[14].

$$I = I_0 + A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (3)$$

I_0 은 정상상태의 전류이고, 여기서 τ_1 과 τ_2 는 완화 시간 상수, A_1 및 A_2 는 상수이고 또한 그래프에 나타나 있는 τ_r 과 τ_d 는 상승 및 감소를 나타내는 시간 상수이다. 산소 후열처리 된 소자의 심자외선 광원이 꺼졌을 때의 감소시간 τ_{d2} 가 3.01 s에서 1.21 s로 감소했다. 이는 산소 후열처리 된 다이오드가 256 nm의 빛에 더 빠르게 반응한다는 것을 나타내고 응답속도가 향상되었음을 의미한다. 후열처리 하지 않은 소자는 빛을 통해 생성된 캐리어들이 박막 내의 존재하는 산소 공공 또는 결함에 포획되는 현상으로 인해 지속 광전류 효과가 나타난다 [15]. 따라서 산소 후열처리로 Ga_2O_3 박막내의 산소공공의 감소와 박막내의 결함분포의 변화가 나타났고, 이로 인해 후열처리 된 소자의 256 nm 빛에 대한 응답속도 향상에 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

(2) Deep Level Transient Spectroscopy

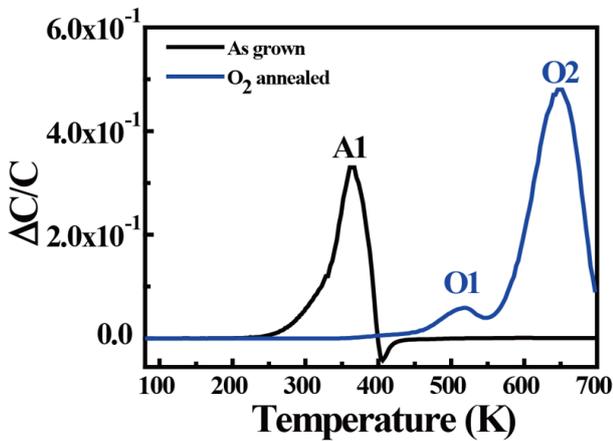


Fig. 6. DLTS spectra for both As-grown and O₂ annealed photodetectors.

그림 6. 산소 후열처리 전/후 photodetector의 DLTS 스펙트럼

그림 6은 후열처리 전후 소자의 깊은 준위 결함 분석 스펙트럼을 나타낸다. 이 측정은 80-700 K의 온도 범위에서 수행되었다. 산소 후열처리를 하지 않은 소자는 350 K 부근에서 A1 피크가 나타났다. 산소 후열처리 된 소자에서는 A1 피크가 나타나지 않았으며, 400 K 이상에서 O1, O2 피크가 나타났다. 산소 후열처리를 통해 박막내의 결함 분포의 변화가 나타난 것을 확인 할 수

있다. 깊은 준위 결함 분석 스펙트럼으로부터 결함에 대한 다양한 파라미터(결함의 에너지 레벨과 결함의 cross section)를 각각 구하여 비교하였고, 이는 식(4)을 통해 구할 수 있다[16].

$$e_n = \sigma_n \gamma_n T^2 \exp(-(E_C - E_V)/k_B T) \quad (4)$$

여기서 γ_n 은 전자의 유효질량과 관련된 상수, σ_n 은 capture cross section 그리고 k_B 는 볼츠만 상수를 나타낸다.

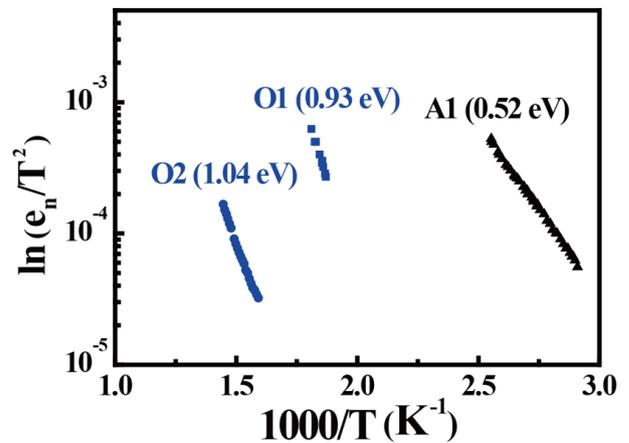


Fig. 7. Arrhenius plot derived from the energy peak levels of the DLTS spectra.

그림 7. DLTS 스펙트럼으로부터 얻은 피크의 에너지 레벨을 이용한 아레니우스 플롯

그림 7은 스펙트럼 분석을 통해 얻어진 깊은 준위 결함 분석 스펙트럼을 Arrhenius plot을 통해 나타낸 그래프이다. 식(4)를 사용하여 $\Delta E = E_C - E_V$ 는 직선의 기울기로부터 구하였다[18]. 산소 후열처리를 하지 않은 소자에서의 A1 결함은 에너지 레벨은 0.52 eV로 측정되었다. 이는 결함이 비교적 얇은 위치에 있음을 알 수 있다. 반면, 산소 후열처리 된 소자에서의 O1, O2 결함의 에너지 레벨은 0.93, 1.04 eV에서 관찰되었으며, 이는 더 깊은 위치에 있다는 것을 의미한다.

Table 1. Summary of trap parameter.

표 1. Ga₂O₃/SiC PD의 결함 정보 정리

Label	$E_C - E_V$ (eV)	σ_t (cm ²)	N_t (cm ⁻³)	Possible attribution
A1	0.52	2.1×10^{-14}	4.5×10^{13}	Fe _{Ga} , Co _{Ga}
O1	0.93	4.8×10^{-14}	1.7×10^{11}	Ti-related (Ti _{Ga})
O2	1.04	3.1×10^{-14}	2.5×10^{13}	Fe _{Ga} , Co _{Ga}

또한 결합의 capture cross section은 그래프의 y절편을 통해서 구했고, 이에 관련된 정보는 표 1에 나타내었다. 특히, 산소 후열처리를 거치지 않은 소자에서의 A1 결합 산소 후열처리 된 소자의 O1, O2 결합보다 전도대역에 가까운 위치에 존재한다. 이러한 결합은 심자 외선 빛에 의해 생성된 캐리어들을 포획하게 되며, 이로 인해 소자의 응답 속도에 영향을 주어 느려지는 현상이 발생하게 된다[17]. 이처럼 산소 후열처리로 인해 발생한 Ga₂O₃/SiC photodetector 내의 결합 분포의 변화가 소자의 특성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

III. 결론

본 연구에서는 SiC 기판 위에 Ga₂O₃ 박막을 RF sputtering을 이용해 증착하여 Ga₂O₃/SiC photodetector를 제작하였고, 산소 후열처리에 따른 재료적, 전기적 특성에 대해 분석하였다. UV-visible spectrophotometer, XPS를 통해 산소 후열처리 전후 박막의 재료적 분석을 진행하였다. 측정결과 산소후열 처리된 박막이 더 낮은 밴드갭을 보였고, 박막내의 산소 공공 비율 24.65 %에서 17.35%로 감소한 것을 확인하였다. 산소 후열처리 된 소자의 광전류가 약 100배 높게 나타났으며 1.15×10^9 의 높은 PDCR 값을 나타내었다. 또한 256 nm 광 응답 특성에서 측정된 감소시간이 1.21, 1.12 s로 후열처리를 하지 않은 박막의 감소시간인 1.34, 3.01 s 보다 더 빠른 반응을 보여주었다. 이는 산소 후열처리로 인해 Ga₂O₃ 박막 내의 산소 공공의 변화와 결합 분포의 변화가 소자의 특성에 영향을 미쳤을 것이라고 판단된다.

References

[1] Baliga, B. J., "Fundamentals of power semiconductor devices," *Springer Science & Business Media*. 2010. DOI: 10.1007/978-0-387-47314-7

[2] S. J. Peatron, "A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices," *Applied physics Reviews*, Vol.5, pp.011301, 2018. DOI: 10.1063/1.5006941

[3] Zhang, Hao, et al. "Structural and optical properties of Nb-doped β -Ga₂O₃ thin films deposited by RF magnetron sputtering," *Vacuum* 146, pp.93-96. 2017. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.09.033

[4] Huang, Lu, et al. "Comparison study of β -Ga₂O₃ photodetectors grown on sapphire at different oxygen pressures," *IEEE Photonics Journal*, vol.9, no.4, pp.1-8, 2017.

DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2731625

[5] Lee, Young-Jae, et al. "Effect of Oxygen Annealing on the Characteristics of Isotype Ga₂O₃/4H-SiC Heterojunction Diodes," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol.15. no.5, pp.561-565, 2020. DOI: 10.1166/jno.2020.2826.

[6] Zhang, Z., et al. "Deep level defects throughout the bandgap of (010) β -Ga₂O₃ detected by optically and thermally stimulated defect spectroscopy," *Applied Physics Letters*, vol.108, no.5, 2016.

DOI: 10.1063/1.4941429

[7] Farzana, Esmat, et al. "Deep level defects in Ge-doped (010) β -Ga₂O₃ layers grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, vol.123, no.16, 2018.

DOI: 10.1063/1.5010608

[8] Farzana, Esmat, et al. "Impact of deep level defects induced by high energy neutron radiation in β -Ga₂O₃." *Apl Materials*, vol.7, no.2, 2019.

[9] Shen, Zhenghao, et al. "The effect of oxygen annealing on characteristics of β -Ga₂O₃ solar-blind photodetectors on SiC substrate by ion-cutting process," *Journal of Alloys and Compounds* 889, pp.161743, 2021. DOI: 10.1063/1.5054606

[10] Makuła, Patrycja, Michał Pacia, and Wojciech Macyk. "How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV-Vis spectra," *The journal of physical chemistry letters* vol.9, no.23, pp.6814-6817, 2018. DOI: 10.1021/acs.jpcllett.8b02892

[11] Gan, Kai-Jih, et al. "Highly durable and flexible gallium-based oxide conductive-bridging random access memory," *Scientific reports*, vol.9, no.1, 14141, 2019.

DOI: 10.1038/s41598-019-50816-7.

[12] Chu, Shao-Yu, et al. "Investigation of Ga₂O₃-based deep ultraviolet photodetectors using plasma-enhanced atomic layer deposition system," *Sensors*, vol.20, no.21, 6159, 2020.

DOI: 10.3390/s20216159

[13] Qin, Yuan, et al. "Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide," *Chinese Physics B*, vol.28, no.1, pp.018501, 2019.

DOI: 10.1088/1674-1056/28/1/018501

[14] Zhang, Meng, et al. "High-performance photodiode-type photodetectors based on polycrystalline formamidinium lead iodide perovskite thin films," *Scientific reports*, vol.8, no.1, 11157, 2018.

DOI: 10.1038/s41598-018-29147-6

[15] Liu, Zeng, et al. "Synergetic Effect of Photoconductive Gain and Persistent Photocurrent in a High-Photoresponse Ga₂O₃ Deep-Ultraviolet Photodetector," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol.69, no.10, pp.5595-5602, 2022.

[16] Lang, D. V. "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors," *Journal of applied physics*, vol.45, no.7, pp.3023-3032, 1974. DOI: 10.1063/1.1663719

[17] Feng, Zhaoqing, et al. "Influence of annealing atmosphere on the performance of a β -Ga₂O₃ thin film and photodetector," *Optical Materials Express*, vol.8, no.8, pp.2229-2237 2018.

DOI: 10.1364/OME.8.002229

BIOGRAPHY

Seung-Hwan Chung (Member)



2022 : BS degree Dept. of Physics, Soongsil University.
2022~current : MS course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Tae-Hee Lee (Member)



2023 : BS degree in Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.
2023~current : MS course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Se-Rim Park (Member)



2023 : BS degree in Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.
2023~current : MS course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Soo-Young Moon (Member)



2022: BS degree in Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.
2022~current: MS course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Hyung-Jin Lee (Member)



2021 : BS degree in Dept. of energy IT Engineering, Far East University.
2021~current : MS course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Geon-Hee Lee (Member)



2019 : BS degree in Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University.
2021 : MS degree in Dept of Energy IT, Far East University.
2021~current : PhD course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.
2021 : Visiting Researcher, RISE, Kista, Stockholm, Sweden

Sang-Mo Koo (Member)

1993 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1997 : MS degree in Engineering Material Physics, KTH - The Royal Institute of Technology.
2003 : PhD degree in, Electronics, KTH-The Royal Institute of Technology.

1999 : Visiting Researcher, MIT, Cambridge, MA, USA

2003~2006 : Researcher, Semiconductor Electronics, Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), MD, USA

2006~2011 : Assistant Professor Kwangwoon University

2014~current : Full Professor, Kwangwoon University

2017~current : Director, Wide Bandgap Semiconductor Reserach Center