

산소 후열처리가 Ga₂O₃/4H-SiC 이종접합 다이오드의 온도에 따른 전기적 특성에 미치는 영향 분석

정승환* · 이형진* · 이희재* · 변동욱* · 구상모**

**광운대학교 전자재료공학과

Influence of Oxygen Annealing on Temperature Dependent Electrical Characteristics of Ga₂O₃/4H-SiC Heterojunction Diodes

Seung Hwan Chung*, Hyung Jin Lee*, Hee Jae Lee*, Dong Wook Byun* and Sang Mo Koo**†

**†Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

We analyzed the influence of post-annealing on Ga₂O₃/n-type 4H-SiC heterojunction diode. Gallium oxide (Ga₂O₃) thin films were deposited by radio frequency (RF) sputtering. Post-deposition annealing at 950 °C in an Oxygen atmosphere was performed. The material properties of Ga₂O₃ and the electrical properties of the diodes were investigated. Atomic Force Microscopy (AFM), X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscope (SEM) images show a significant increase in the roughness and crystallinity of the O₂-annealed films. After Oxygen annealing X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) shows that the atomic ratio of oxygen increases which is related to a decrease in oxygen vacancy within the Ga₂O₃ film. The O₂-annealed diodes exhibited higher on-current and lower leakage current. Moreover, the ideality factor, barrier height, and thermal activation energy were derived from the current-voltage curve by increasing the temperature from 298 – 434K.

Key Words : Gallium oxide, Silicon carbide, Oxygen annealing, Hetero junction diode

1. 서 론

최근에는 산화갈륨 (Ga₂O₃), 질화갈륨 (GaN), 탄화규소 (SiC) 등을 포함하는 와이드 밴드갭 소재가 실리콘 대비 고주파, 고온, 고전력용 소자에 대해 적용이 가능한 우수한 소재로 많은 연구가 진행되고 있다. 그중 Ga₂O₃는 와이드 밴드갭 소재중에 차세대 반도체 소자로 각광받고 있는 소재이다.

Ga₂O₃는 α , β , γ , δ , ϵ 의 다섯가지 상이 존재하는데 이 중 β 상의 Ga₂O₃가 다른 상들 보다 열적으로 안정적인 상태를 유지할 수 있다. β -Ga₂O₃은 약 4.9 eV의 큰 밴드갭 에너지와 ~8 MV/cm의 높은 임계 전계 값을 갖고 있으며 다른 상

들보다 물리적 화학적으로 우수한 특성을 보이고 800 °C 이상의 고온 열처리를 통해 β 상을 쉽게 형성할 수 있다는 장점이 있다. [1-3]

하지만 β -Ga₂O₃은 낮은 열전도율(0.2 W/cm·K)을 가지고 있는데 이는 실리콘(Si)의 열전도율 (1.5 W/cm·K)에 비해 매우 낮은 값을 가진다. 이는 전기적 성능을 저하시키는 큰 요인이다. β -Ga₂O₃의 낮은 열전도율은 높은 열전도율을 가지는 재료와 이종접합을 형성하여 보완할 수 있다. 탄화규소(silicon carbide)는 실리콘의 열전도율 보다 높은 열전도율(~4.6 W/cm·K)을 보이며 그중 4H-SiC의 격자구조 ($a = b = 3.07 \text{ \AA}$)와 β -Ga₂O₃의 격자구조($a = 12.23 \text{ \AA}$, $b = 3.04 \text{ \AA}$) 사이의 격자 불일치 정도는 약 ~2 % 낮기 때문에 이종접합 과정에서 생기는 결함을 최소화할 수 있다. RF sputtering을 이용해 증착한 Ga₂O₃는 비정질 형태를 띠고 있고 후열처리

†E-mail: smkoo@kw.ac.kr

를 통해 결정질을 향상시키거나 소자의 재료적, 전기적 특성을 변화시킬 수 있기 때문에 후열처리 과정이 필요하다[4-5].

본 연구에서 n타입 4H-SiC 기판위에 Ga₂O₃ 박막을 RF sputtering을 이용해 증착하여 이종접합 다이오드를 제작하였다. 산소 분위기에서 후열처리에 따른 Ga₂O₃ 박막의 특성과 그에 따른 이종접합 다이오드의 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 Ga₂O₃/4H-SiC 이종접합 다이오드 구조이다. 소자는 N-type 4H-SiC 웨이퍼 (base substrate: $N_D = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, n-type epi layer: $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 기판을 사용하여 제작했다. Radio Corporation of America (RCA) 및 황산(H₂SO₄)와 과산화수소(H₂O₂)를 4:1로 혼합한 용액으로 기판 cleaning 작업을 수행했다. 이후 buffered oxide etch 용액(BOE)을 사용하여 native SiO₂를 제거하였다. 후면 음극 형성을 위해 E-beam evaporation 증착장비를 사용하여 150 nm 두께의 니켈(Nickel)을 증착하였다. 소자의 MS 접합을 오믹화 하기 위해 90초 동안 N₂ 분위기로 1050°C에서 Rapid thermal annealing (RTA)를 수행하였다. 그후 RF sputtering을 사용하여 Ga₂O₃ 박막을 증착했다. Sputtering 조건은 Ar 가스를 챔버에 주입했고, 증착 시간 동안 챔버의 기압은 26 mTorr의 압력, RF의 전력은 120W로 450 nm의 박막을 증착하였다. 증착된 Ga₂O₃ 박막을 산소 분위기에서 60분 동안 950°C에서 열처리를 하였고, 이후 상부 양극을 증착하기 위해 E-beam evaporation 증착장비를 이용해 150 nm의 니켈을 증착하였다. 상부 전극을 증착하기 전에 재료적 성질을 분석하기 위해, X-Ray Diffraction (XRD), Atomic Force Microscope (AFM), Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)가 측정되었다. AFM과 SEM을 통해 산소분위기에서의 후열처리에 따른 입자 크기 및 표면 거칠기를 분석했고, XPS를 통해 결합에너지 변화를 분석하였다. 이종접합 다이오드는 서로 다른 반도체를 접합한 다이오드이다. n-type Ga₂O₃는

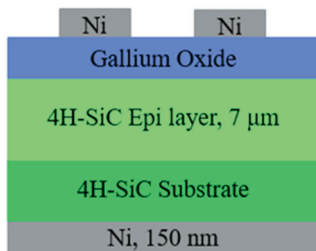


Fig. 1. Structure of Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction diode.

n-type 4H-SiC에 비해 밴드 갭이 넓으며, 이종접합을 형성할 때 Ga₂O₃에서 SiC쪽으로 전자가 흐른다. 이는 SiC 측에 전자 축적층이 형성되고, Ga₂O₃측에 공핍층이 형성되도록 한다. β-Ga₂O₃ 및 4H-SiC의 전자 친화도는 각각 4.0과 3.45 eV로 보고되었다 [6]. 따라서 전도대역과 가전자대역의 offset이 각각 0.55 eV와 2.11 eV이다. 그 결과 4H-SiC에는 0.45 eV의 장벽이 생기기 때문에 순방향으로는 전류가 잘 흐르지만 역방향에서는 전류가 잘 흐르지 못하게 된다. 이러한 이종접합 다이오드의 전기적 성질을 분석하기 위해 전류-전압을 측정하였고, 온도에 따른 전류량 변화를 확인하였으며 다이오드의 barrier height, 이상계수, 열 활성화 에너지를 추출하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재료적 성질

3.1.1 Atomic Force Microscope (AFM)

RF Sputtering을 이용해 증착한 Ga₂O₃ 박막의 표면 형태 및 거칠기를 관찰하기 위해 Atomic Force Microscope (AFM)의 non-contact mode를 이용하였다. Fig. 2 (a), (b)는 각각 산소분위기에서 후열처리를 하지 않은 샘플과 후열처리를 진행한 샘플의 3D와 2D 이미지(1 μm×1 μm)이다. 그림에 나타났듯이 산소분위기에서 후열처리를 해주게 되면 표면의 거칠기가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 표면의 거칠기를 의미하는 Root-Mean-Square (RMS)는 후열처리를 하지 않은 샘플과 산소 후열처리를 해준 샘플 각각 0.3 nm와 1.27 nm로 측정되었다. 산소 후열처리를 해준 샘플의 표면이 더 거칠게 나타났는데 이는 에너지를 받은 표면의 원자들이 더 안정된 결정으로 이동하여 응집한 결과 결정립 사이에 미세한 공극과 관련이 있다 [7].

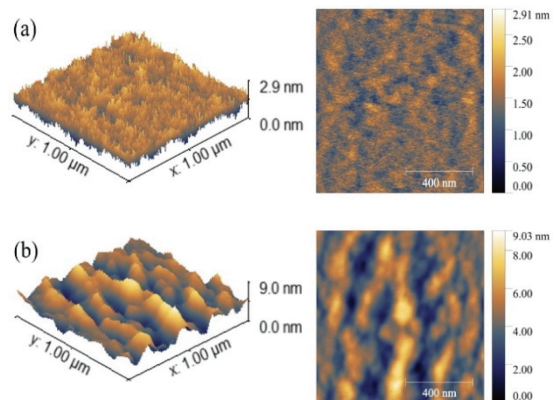


Fig. 2. AFM surface images of Ga₂O₃ thin film (a) As-grown (b) O₂-annealed.

3.1.2 X-Ray Diffraction (XRD)

Fig. 3은 XRD를 이용하여 산소분위기에서 후열처리가 Ga₂O₃/4H-SiC diodes의 결정학적 특성에 미치는 영향을 분석한 결과이다.

산소 후열처리를 진행한 소자와 후열처리를 진행하지 않은 소자 모두 28° 근처에서 4H-SiC (0004)의 기판에 대한 피크가 강하게 나타나 있다. 하지만 후열처리를 하지 않은 소자에서는 Ga₂O₃에 해당하는 피크를 확인할 수 없었지만, 산소 후열처리를 진행한 소자에서 Ga₂O₃에 해당하는 피크(-210), (410)과 (-603)가 뚜렷하게 나타났다. 이는 RF 스퍼터링으로 증착된 Ga₂O₃ 박막은 특정한 방향성을 띄지 않는 비정질의 상태를 띠고 있었지만, 산소 후열처리를 통해서 결정화 한 것으로 보인다 [8].

후열처리에 따른 결정크기의 변화를 Scherrer 방정식인 식 (1)을 이용하여 구했다 [9].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \tag{1}$$

D는 결정크기, β는 Full Width at Half Maximum (FWHM), θ는 회절각이다. 피크는 Ga₂O₃에 해당하는 (-410)피크로 계산 해주었다. 계산한 결정크기는 Table 1에 나타내었다. 측정 결과 산소 후열처리를 통해서 결정크기가 커졌음을 확인했다.

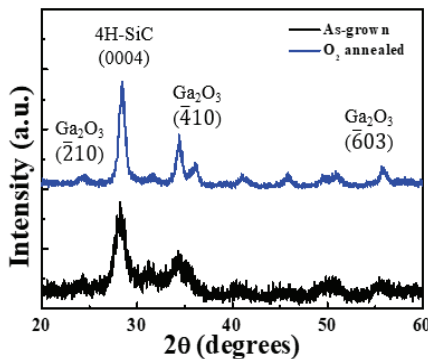


Fig. 3. XRD patterns obtained at As-grown and O₂-annealed Ga₂O₃/4H-SiC diodes.

Table 1. XRD patterns obtained at As-grown and O₂-annealed Ga₂O₃/4H-SiC diodes

Sample	2θ [°]	FWHM [rad]	Grain size [nm]
As-grown	33.21	2.233	3.88
O ₂ -annealed	34.43	0.751	11.57

3.1.3 Scanning electron microscope (SEM)

Fig. 4 (a), (b)는 각각 후열처리를 하지 않은 박막과 산소 분위기에서 후열처리를 해준 박막의 SEM 이미지이며, 박막의 표면을 분석한 결과이다. SEM 이미지는 10 kV 배율로 측정되었다. Fig 4(a)의 결과로부터 후열처리를 하지 않은 샘플의 박막에서는 균열을 나타내지 않고 균질한 표면을 보여주고 결정립을 확인할 수 없었다. Fig 4(b)의 산소 후열처리를 한 샘플의 박막에서는 표면에 증착된 작은 입자들이 뭉치게 되면서 표면이 거칠어지고 결정립이 성장한 것을 확인했다. 이는 Fig. 3의 결과에서도 확인했듯이, 산소 후열처리를 통해서 증가된 결정립의 크기는 표면원자의 결정화가 일어났음을 의미한다 [10].

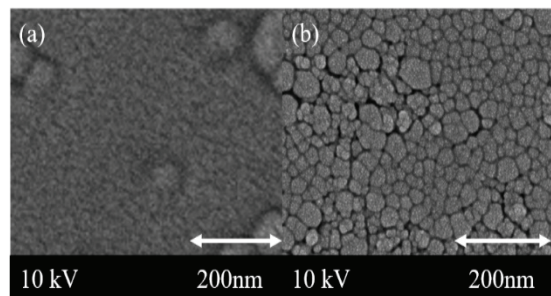


Fig. 4. SEM images of Ga₂O₃ thin film (a) As-grown (b) O₂-annealed.

3.1.4 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

Fig. 5는 XPS를 이용하여 각 샘플의 O 1s 스펙트럼을 분석한 그래프이다. C 1s peak의 결합에너지 값인 281.6 eV이 용해 XPS측정 peak의 영점을 맞춰주었고, O 1s peak는 Oxygen lattice와 관련된 peak와 Oxygen vacancy와 관련된 두 개의 Gaussian peak로 구성 되어있다 [11].

O 1s를 구성하는 두개의 peak중에 낮은 결합에너지 (530.8 eV)에 해당하는 peak는 Ga₂O₃ 산화물에서 Ga 원자와 결합된 O²⁻이온과 관련된 Oxygen lattice peak이고 높은 결합에너지 (532.2 eV)에 해당하는 peak가 Oxygen vacancy와 관련된 peak이다. 산소 후열처리 결과 전체의 O 1s peak에서 Oxygen vacancy와 관련된 피크의 면적비가 22.86 %에서 15.45 %로 감소함을 확인했다. 산소 후열처리로 인해서 박막 내의 산소원자가 많아졌고, 이어서 산소 원자가 결정 구조내의 산소 결핍 영역으로 확산하여 Oxygen vacancy가 감소했을 수도 있다.

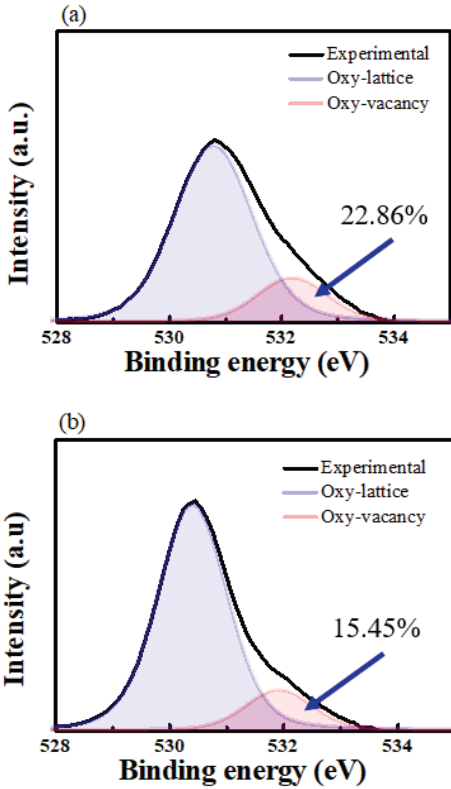


Fig. 5. O 1s peaks of Ga₂O₃ thin film (a) As-deposited and (b) O₂-annealed.

3.2 전기적 성질

3.2.1 I-V-T characteristics

Fig 6은 측정 온도 변화에 따른 두 다이오드에 흐르는 전류를 측정하여 그래프로 나타내었다. 측정범위는 -10 ~ 10 V로 0.01 V 스텝으로 측정하였고 측정온도는 298 K에서 423 K로 증가시키며 측정하였다. 298 K에서 산소 후열처리를 한 소자의 on-current (1.2×10² A)가 열처리를 하지 않은 소자의 on-current (1.0×10⁴ A) 보다 높게 측정되었다. 이는 열처리로 인해 표면의 결정성이 전류량에 영향을 미쳤을 수도 있다.

또한 산소 후열처리한 소자의 누설전류가 더 낮게 측정되는 것을 확인하였는데, 이는 Fig 5에서 산소 후열처리로 인해 Oxygen vacancy의 감소가 누설전류와 관련 있을 수도 있다. Fig 6에서 온도가 높을수록 역전압에서의 누설 전류가 증가하는 것을 확인했다. 이는 온도가 오를수록 전자가 더 높은 장벽을 넘기 위한 충분한 에너지를 얻기 때문이다 [12]. 이러한 현상을 정량적으로 확인하기 위하여 Thermionic emission (TE) 이론으로 분석하였다. 이론에 따르면 전압과 전류의 관계는 식 (2)을 따르고 포화 전류 I₀은 식 (3)를 따른다[13-14].

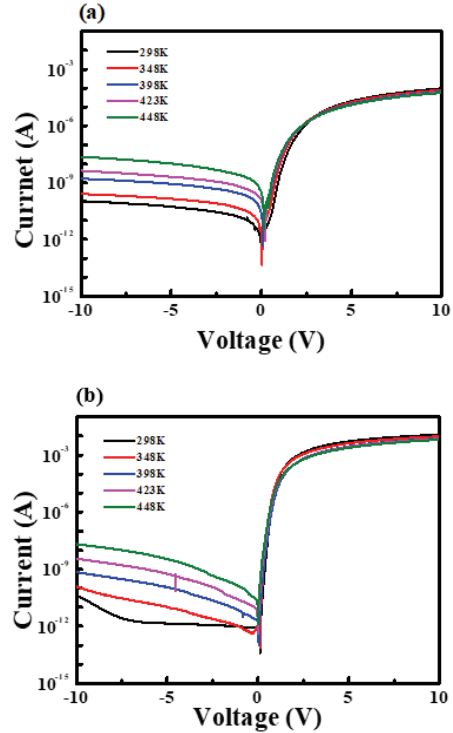


Fig. 6. Current-Voltage characteristics of Ga₂O₃/4H-SiC diodes in the temperature range 298-448K for As-grown (a), O₂-annealed (b).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (3)$$

q는 전자의 전하량, A는 전류에 대한 다이오드의 유효 면적, k는 볼츠만 상수, A*는 Richardson constant (Ga₂O₃의 이론 값 ~41.11 A cm⁻¹ K²)이다 [12]. 다이오드의 전도 메커니즘을 이해하기 위해서는 ϕ_B , n, I₀에 대해서 알아야 하고, 이상수들은 I-V 특성을 통해서 구해줄 수 있다. 포화전류 I₀은 ln I-V 그래프의 절편으로 결정된다. I₀이 결정되면 barrier height ϕ_B 는 식 (4)을 통해서 구했다.

$$\phi_B = \left(\frac{kt}{q}\right) \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4)$$

이상계수 n은 ln I-V는 순방향 영역의 기울기에서 결정되고 이는 식 (5)로 구했다.

$$n = \left(\frac{q}{kT}\right) \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5)$$

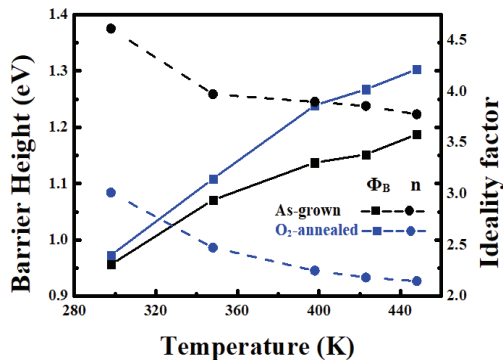


Fig. 7. The extracted barrier height Φ_B and ideality factor n from I-V characteristics in the temperature range 298-448K (a) As-grown, (b) O₂-annealed.

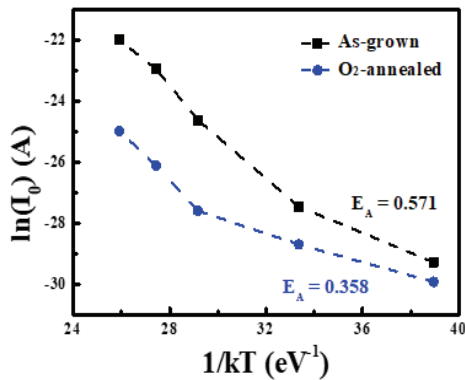


Fig. 8. $\ln(I_0)$ - $1/kT$ curve for the activation energy values derived from the increasing temperature.

Fig. 7은 298 K에서 458 K의 온도범위에서 Fig. 5의 I-V특성에서 도출한 n 과 Φ_B 의 변화를 나타낸 그래프이다. 온도가 증가함에 따라 이상계수의 크기가 작아지면서 1에 가까워졌다. 산소 후열처리를 한 소자의 이상 계수의 크기가 3.01에서 2.1 감소하고 열처리를 하지 않은 소자는 4.6에서 3.7로 감소했다. 온도가 높을수록 소자에 흐르는 전류량 증가가 이상계수 감소에 기인할 수 있다. 온도가 증가함에 따라 두 소자의 barrier height도 같이 증가하는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 $\ln(I_0)$ - $1/kT$ 그래프에서 구한 열활성화 에너지이다. 실험을 통해 구해진 열 활성화 에너지는 금속과 Ga₂O₃의 계면의 trap과 barrier height와 관련이 있다. 산소 후열처리를 한 소자와 후열처리를 하지 않은 소자의 열활성화 에너지는 각각 0.358과 0.571 eV로 측정되었다. 열 활성화 에너지 감소는 산소 후열처리를 통해 산소 관련 trap과 oxygen vacancy 감소와 barrier height의 증가가 영향을 미쳤을 것이다 [15].

4. 결론

본 연구에서는 n-type 4H-SiC 기판 위에 Ga₂O₃ 박막을 RF sputter를 이용해 증착하여 이중접합 다이오드를 제작하였다. 산소 분위기에서 후열처리에 따른 Ga₂O₃의 물성과 다이오드의 전기적 특성을 분석하였다. AFM, XRD과 SEM를 이용해 산소 분위기에서 후열처리를 한 소자 박막의 결정성이 향상되었음을 확인했고 XPS 결과를 통해 산소 분위기에서 열처리를 한 소자의 Oxygen vacancy가 감소한 것을 확인했다. 산소 열처리를 한 다이오드의 누설전류는 열처리를 하지 않은 다이오드보다 낮은 값을 가지고 on-state에서는 더 큰 전류량을 가졌고 낮은 이상계수와 열활성화 에너지를 보였다. 그러므로 산소 후열처리를 진행한 소자가 고열 환경에서 더 안정적으로 동작할 것이라고 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Program Development of 1.2kV low-loss Gallium Oxide transistor (RS-2022-00144027) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea), Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (P0012451) and has been conducted by the Research Grant of Kwangwoon University in 2022.

참고문헌

- Dong, L., Jia, R., Xin, B., & Zhang, Y. (2016). Effects of post-annealing temperature and oxygen concentration during sputtering on the structural and optical properties of β -Ga₂O₃ films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 34(6), 060602.
- Zhang, H., Deng, J., Pan, Z., Bai, Z., Kong, L., & Wang, J. (2017). Structural and optical properties of Nb-doped β -Ga₂O₃ thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Vacuum*, 146, 93-96
- Yu, J., Nie, Z., Dong, L., Yuan, L., Li, D., Huang, Y., ... & Jia, R. (2019). Influence of annealing temperature on structure and photoelectrical performance of β -Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction photodetectors. *Journal of Alloys and Compounds*, 798, 458-466
- Byun, D. W., Lee, Y. J., Oh, J. M., Schweitz, M. A., & Koo, S. M. (2021). Morphological and electrical properties of β -Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction diodes. *Electronic Materials Letters*, 17(6), 479-484.

5. Lee, Y. J., Schweitz, M. A., Oh, J. M., & Koo, S. M. (2020). Influence of annealing atmosphere on the characteristics of Ga₂O₃/4H-SiC n-n heterojunction diodes. *Materials*, 13(2), 434.
6. Qu, Y., Wu, Z., Ai, M., Guo, D., An, Y., Yang, H., ... & Tang, W. (2016). Enhanced Ga₂O₃/SiC ultraviolet photodetector with graphene top electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 680, 247-251.
7. Phan, D. T., & Chung, G. S. (2011). The effect of post-annealing on surface acoustic wave devices based on ZnO thin films prepared by magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 257(9), 4339-4343.
8. Goyal, A., Yadav, B. S., Thakur, O. P., Kapoor, A. K., & Muralidharan, R. (2014). Effect of annealing on β -Ga₂O₃ film grown by pulsed laser deposition technique. *Journal of alloys and compounds*, 583, 214-219.
9. Djurado, E., Bouvier, P., & Lucazeau, G. (2000). Crystallite size effect on the tetragonal-monoclinic transition of undoped nanocrystalline zirconia studied by XRD and Raman spectrometry. *Journal of Solid-State Chemistry*, 149(2), 399-407.
10. Tien, C. H., Hsiao, B. W., Chen, C. M., Chen, M. I., Chiang, J. L., & Wu, D. S. (2020). Nitrogen and oxygen annealing effects on properties of aluminum-gallium oxide films grown by pulsed laser deposition. *Ceramics International*, 46(15), 24147-24154.
11. Fang, D., He, F., Xie, J., & Xue, L. (2020). Calibration of binding energy positions with C1s for XPS results. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 35(4), 711-718.
12. Akkaya, A., & Ayyıldız, E. (2016, April). Effects of post annealing on IVT characteristics of (Ni/Au)/Al_{0.09}Ga_{0.91}N Schottky barrier diodes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 707, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
13. Zeghdar, K., Dehimi, L., Saadoune, A., & Sengouga, N. (2015). Inhomogeneous barrier height effect on the current-voltage characteristics of an Au/n-InP Schottky diode. *Journal of Semiconductors*, 36(12), 124002.
14. Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied physics letters*, 49(2), 85-87.
15. Li, A., Feng, Q., Zhang, J., Hu, Z., Feng, Z., Zhang, K., ... & Zhou, H. (2018). Investigation of temperature dependent electrical characteristics on Au/Ni/ β -Ga₂O₃ Schottky diodes. *Superlattices and Microstructures*, 119, 212-217.

접수일: 2022년 12월 12일, 심사일: 2022년 12월 15일,
게재확정일: 2022년 12월 20일