

어닐링이 RF 스퍼터링으로 제작된 Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC 소자에 미치는 영향 연구

이희재* · 김민영* · 문수영* · 변동욱* · 정승우* · 구상모**

**광운대학교 전자재료공학과

Effect of Annealing on Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC Devices Fabricated by RF Sputtering

Hee-Jae Lee*, Min-Yeong Kim*, Soo-Young Moon*, Dong-Wook Byun*,
Seung-Woo Jung* and Sang-Mo Koo**

*†Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

We reported on annealing effect on Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC devices grown by radio frequency sputtering method. Post-deposition annealing at 900 °C was performed, which results in crystallization in the Ga₂O₃ films. The major peaks (-401) and (403) of Ga₂O₃ which was thermally treated at 900 °C appears in the x-ray diffraction (XRD) results. Auger electron spectroscopy (AES) shows that Ga and Al atoms seems to be diffused into the opposite direction Al₂O₃ and Ga₂O₃ after annealing. Transfer and output characteristics of back-gate transistor were analyzed where SiC substrate is used as gate material. On-state current and on/off ratio increased almost 10⁹ and 10⁶ times higher in the 900 °C annealed sample.

Key Words : Ga₂O₃, SiC, transistor, annealing, heterojunction

1. 서 론

산화갈륨 (Ga₂O₃)은 알파, 베타, 감마, 델타, 엡실론의 5 가지 상을 갖는다 [1]. 그 중에서도 베타 상의 산화갈륨 (β -Ga₂O₃)은 상온에서부터 약 1800 °C까지의 온도에서 준안정적인 (metastable) 다른 상의 Ga₂O₃와 다르게, 안정적인 (stable) 상태를 유지할 수 있다 [2]. β -Ga₂O₃은 약 4.9 eV의 큰 밴드갭 에너지, 8 MV/cm의 임계 전계값을 갖고 있으며 물리, 화학적 특성이 우수하고 [3,4] 800 °C 이상의 열처리를 통해 베타 상을 쉽게 형성할 수 있다는 장점이 있다 [5].

n타입 도핑 제어가 가능한 β -Ga₂O₃의 전자 이동도는 약 300cm²/Vs로 다른 반도체보다 상대적으로 낮지만, 전력 반도체의 성능을 평가하는 지수인 Baliga's Figure of Merit

(BFOM)이 약 3400으로 다른 와이드 밴드갭 재료인 GaN 및 4H-SiC 보다 약 5배 이상 뛰어나기 때문에 차세대 전력 반도체에 적합한 소재이다 [6]. 그러나 β -Ga₂O₃의 열전도율은 약 0.2 W/cmK로 4H-SiC (약 2.7 W/cmK)와 GaN (약 1.7 W/cmK)보다 약 10배 낮으며, 이는 전기적 성능을 저하시키는 치명적인 단점이다 [7]. β -Ga₂O₃의 낮은 열전도율은 4H-SiC (약 3.7 W/cmK)와 같은 높은 열전도율을 갖는 재료와 이종접합을 형성하여 보완할 수 있다.

β -Ga₂O₃ (a = 12.23 Å, b = 3.04 Å)와 4H-SiC (a = b = 3.07 Å) 사이의 격자 불일치는 약 2% 정도로 낮기 때문에 이종접합 성장 중 결함을 최소화할 수 있다 [7,8].

β -Ga₂O₃는 매우 큰 에너지 밴드갭을 가져 metal-oxide-semiconductor (MOS) 구조에서 선호되는 1eV 이상의 conduction band offset을 형성하기 위해 Al₂O₃, SiO₂, HfO₂와 같은 유전체 재료를 사용하여 β -Ga₂O₃ 기반의 MOSCAP 구

†E-mail: smkoo@kw.ac.kr

조가 활발하게 연구되고 있다 [9].

Radio frequency (RF) 스퍼터링을 사용하여 증착된 Ga_2O_3 는 특정한 결정 방향이 없는 비정질 상태를 띄고 있으며, 어닐링을 통해 결정질을 향상시키거나 전기적, 화학적 특성을 변화시킬 수 있기 때문에 열처리 과정이 필요하다 [10,11].

이에 본 연구에서는 SiC 기판 위에 Al_2O_3 절연층과 Ga_2O_3 박막을 순서대로 증착 후 어닐링 하여 물성 및 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

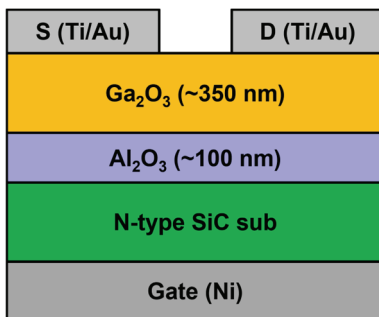


Fig. 1. Schematic of $Ga_2O_3/Al_2O_3/4H$ -SiC structures.

본 논문에서는 도핑농도가 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 인 n-타입 4H-SiC를 사용하였다. 그리고 아세톤, 메탄올, DI water, 4:1 비율의 황산 (H_2SO_4)과 과산화수소 (H_2O_2)를 혼합한 SPM 용액으로 기판의 불순물을 제거하였고, 30:1 비율의 buffered oxide etcher (BOE) 용액으로 native oxide를 제거하였다. Back-gate 형성을 위해 전자빔 증착 장비를 사용하여 120 nm 두께의 니켈을 증착하고, 급속 열처리 장비를 사용하여 1000 °C의 N_2 분위기에서 1분간 열처리를 통해 SiC와 Ohmic 접합을 형성하였다. 기판 위에 RF 스퍼터링 방법을 사용하여 120W의 파워로 Ar 가스를 4 sccm으로 주입하며 Al_2O_3 (100 nm)와 Ga_2O_3 (350 nm)를 증착하여 $Ga_2O_3/Al_2O_3/SiC$ 구조를 제작하였다. 소자에 어닐링이 미치는 영향을 비교하기 위해 900 °C의 N_2 분위기에서 1시간 동안 어닐링 하였다. 이후 소스와 드레인으로 20/100 nm 두께의 티타늄과 금을 전극으로 증착하였다. 그림 1은 소자의 개략도를 나타낸다.

물성 분석을 하기 위해 x-ray diffraction (XRD)으로 2theta-scan을 하여 Ga_2O_3 의 결정 및 방향을 분석하였다. 또한 Auger electron spectroscopy로 소자의 depth profiling을 하여 깊이에 따른 원소 비율을 분석하였다. 전기적 특성을 분석하기 위해 Keithley-4200 장비를 이용하여 고도핑된 4H-SiC 기판을 back-gate로 gate 전압을 인가할 때 Ga_2O_3 channel

에 흐르는 드레인 전류를 측정 및 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 XRD 를 이용한 결정 및 방향 분석

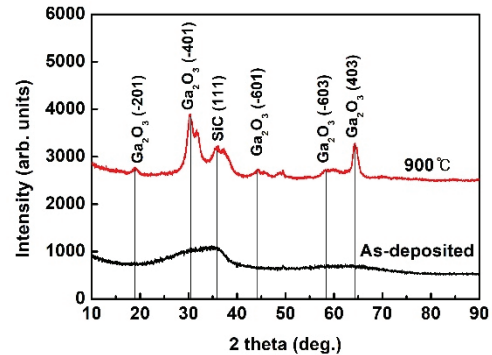


Fig. 2. XRD 2theta-scan spectra of the Ga_2O_3 thin films.

XRD (CuK α , 30 mA, 40 kV, Philips X'Pert PW 3040)를 이용하여 어닐링에 따른 Ga_2O_3 박막의 결정 및 방향을 분석하였다. 그림 2는 Ga_2O_3 RF 스퍼터링 타겟을 사용하여 증착한 Ga_2O_3 박막에 대한 10 ~ 90 ° 범위의 XRD 2theta-scan 패턴을 나타낸다. As-deposited와 900 °C annealed 소자 모두 36 ° 근처에서 SiC (111)의 기판에 대한 강한 피크가 나타나 있다. 900 °C로 어닐링을 하였을 때 (111) 피크 외에 다양한 피크 중, 30 °와 64 ° 근처에서 Ga_2O_3 에 대한 강한 피크 (-401)과 (403)가 관측되며 RF 스퍼터링으로 증착한 박막이 고온의 어닐링을 통해 결정화 한 것으로 보인다 [5]. 두 소자에서 Al_2O_3 에 대한 피크는 관찰되지 않으며, 어닐링을 통해 비정질의 Al_2O_3 를 결정화 시키기 위해 1000 ~ 1050 °C 이상의 온도가 필요하다 [12,13]. Ga_2O_3 어닐링에 사용된 900 °C의 온도는 Al_2O_3 를 결정화 하기에 비교적 낮은 것으로 보인다.

3.2 AES depth profiling 분석

Auger electron spectroscopy로 박막의 깊이에 따른 원소 분포를 분석하였다. PHI 710를 이용하여 빔 에너지는 5kV, 타겟 전류는 5nA이고, 2 mm \times 2 mm 면적을 스퍼터링 하며 측정하였다. 그림 3 (a)와 (b)는 각각 As-deposited와 900 °C annealed 소자의 스퍼터링 시간에 따른 원소 비율을 나타낸다. $Ga_2O_3/Al_2O_3/SiC$ 에서 계면 부분을 제외하고 각 원소의 농도 비율이 일정하게 유지하는 것이 확인되었다. As-

deposited 소자에서 depth profiling은 Ga₂O₃와 Al₂O₃ 계면의 원소 농도 기울기가 가파른 것을 보여준다. 900 °C annealed 소자의 Ga₂O₃/Al₂O₃ 계면에서 Al과 Ga의 기울기가 감소하였고 깊이에 따른 원소 농도가 변화한 것으로 확인되었다 [14,15]. Al₂O₃/SiC 계면에서는 어닐링 이후 원소분포의 변화는 없는 것으로 확인되었다.

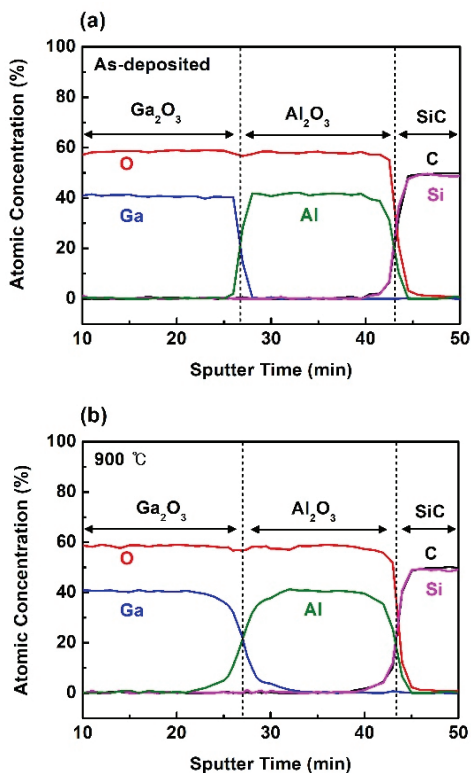


Fig. 3. Auger electron spectroscopy (AES) of (a) As-deposited and (b) 900 °C annealed Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC.

3.3 Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC 트랜지스터 전기적 특성

Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC 소자의 전기적 특성을 분석하기 위해 Keithley-4200 장비를 이용하여 소스-드레인에 0 ~ 10 V의 전압을 인가하고, back-gate에 -8 ~ 2 V의 전압을 인가하여 드레인 전류를 측정하였다. 그림 4 (a)와 (b)는 as-deposited와 900 °C annealed 소자의 I_D-V_D 그래프를 나타낸다. Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC 트랜지스터 소자에서 드레인의 순방향 전압을 증가시키면 드레인 전류가 증가하고, back-gate에 인가되는 전압이 2에서 -8 V로 감소할수록 Ga₂O₃의 채널이 열려 드레인 전류가 증가한다. As-deposited 소자의 드레인 전류는 back-gate 바이어스가 -8 V일때 약 10⁻¹¹ A로 매우 낮

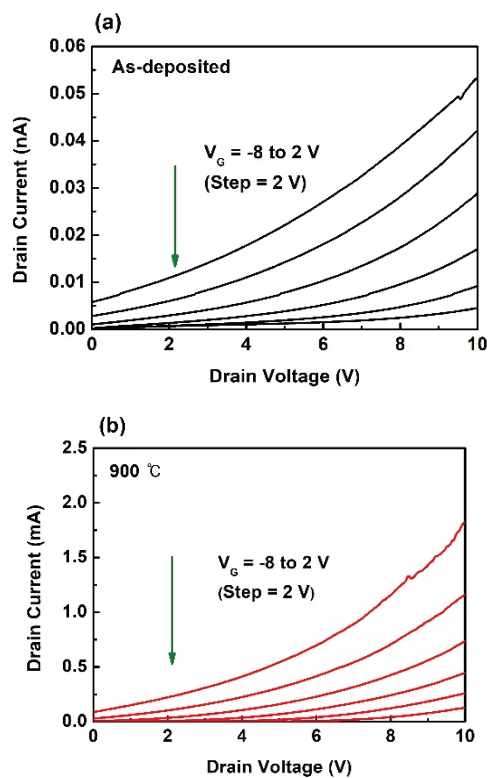


Fig. 4. Output curves (I_D-V_D) for (a) As-deposited and (b) 900 °C annealed Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC transistor.

다. 900 °C에서 Ga₂O₃의 열처리 후 back-gate 바이어스가 -8 V일 때 드레인 전류가 약 10³ A로 증가하여 높은 전기전도도를 보였다.

그림 5는 어닐링 전후 두가지 트랜지스터를 비교한 log scale I_D-V_G 그래프이다. V_D=2 V이고, V_G는 -8 ~ 2 V 범위에서 드레인 전류를 측정하였다. 그래프를 통해 두 소자에서 V_G가 음의 전압으로 감소할 때 드레인 전류가 증가하는 것을 확인하였다. 900 °C 어닐링 후에 소자의 on/off 상태의 전류 값이 모두 증가하였지만, on 상태의 전류가 특히 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Off 상태의 누설전류는 약 9.89 × 10⁻¹² A로 낮게 유지하면서 on 상태의 전류는 6.9 × 10² A로 증가하여 on/off ratio 또한 증가하였다. XRD 결과에서 확인할 수 있듯이 고온의 어닐링을 통해 Ga₂O₃가 결정화하며 박막의 기생저항을 감소시켜 우수한 전기적 특성을 가지게 되는데 영향이 있을 수 있다 [16]. 어닐링에 따른 Ga₂O₃/Al₂O₃/SiC 트랜지스터의 전류 값과 on/off ratio의 변화는 표 1에 나타나 있다.

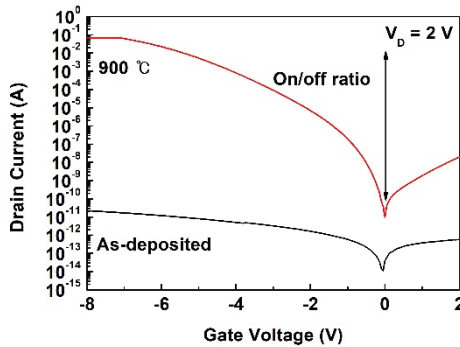


Fig. 5. Transfer curves (I_D - V_G) for As-deposited and 900 °C annealed $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ transistor.

Table 1. Electrical characteristic of the as-deposited and 900 °C annealed $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ transistor

	On current [A] ($V_G = -8$ V)	Off current [A] ($V_G = 0$ V)	On/off ratio
As-deposited	5.31×10^{-11}	1.12×10^{-14}	4.74×10^3
900 °C annealed	6.9×10^{-2}	9.89×10^{-12}	6.98×10^9

4. 결 론

본 연구에서 RF 스퍼터링을 이용하여 SiC 기판에 Al_2O_3 와 Ga_2O_3 박막을 순차적으로 증착하고, 900 °C의 고온 어닐링의 영향을 비교하였다. XRD의 (401), (403) 피크를 통해 어닐링을 통해 소자의 Ga_2O_3 의 결정질이 향상되었음을 알 수 있다. 소자의 깊이에 따른 원소 분포 분석결과, 어닐링 후 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 계면에서 Ga와 Al 원소의 확산이 발생하였다. 전류-전압 측정장비를 사용하여 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ back-gate 트랜지스터의 output 특성과 transfer 특성을 분석하였다. Back-gate에 음의 전압을 인가하면 Ga_2O_3 에 채널이 형성되어 드레인 전류가 증가하였다. 어닐링을 한 소자는 on, off 전류가 모두 증가하였지만, off 상태에서는 $I_D = 9.89 \times 10^{-12}$ 로 낮게 유지되고 on 상태일 때 $I_D = 6.9 \times 10^2$ 로 크게 증가하였다. 결과적으로 on/off ratio가 4.74×10^3 에서 6.98×10^9 로 증가하여, 어닐링을 통해 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 의 물성과 전기적 특성이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

감사의 글

This work was supported by Technology Innovation Program (20016102) grant by MOTIE, the Korea Institute of Energy Technology

Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (20214000000700) funded by the Korea Government, and the Excellent researcher support project of Kwangwoon University in 2022.

참고문헌

- Wu, J., Mi, W., Yang, Z., Chen, Y., Li, P., Zhao, J., ... & Luan, C. (2019). Influence of annealing on the structural and optical properties of gallium oxide films deposited on c-sapphire substrate. *Vacuum*, 167, 6-9.
- Altuntas, H., Donmez, I., Ozgit-Akgun, C., & Biyikli, N. (2014). Effect of postdeposition annealing on the electrical properties of β - Ga_2O_3 thin films grown on p-Si by plasma-enhanced atomic layer deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 32(4), 041504.
- Yadav, M. K., Mondal, A., Das, S., Sharma, S. K., & Bag, A. (2020). Impact of annealing temperature on band-alignment of PLD grown $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Si}$ (100) heterointerface. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 153052.
- Wang, Y., Xu, W., You, T., Mu, F., Hu, H., Liu, Y., ... & Hao, Y. (2020). β - Ga_2O_3 MOSFETs on the Si substrate fabricated by the ion-cutting process. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63(7), 1-4.
- Byun, D. W., Lee, Y. J., Oh, J. M., Schweitz, M. A., & Koo, S. M. (2021). Morphological and Electrical Properties of β - $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ Heterojunction Diodes. *Electronic Materials Letters*, 17(6), 479-484.
- Lee, Y. J., Schweitz, M. A., Oh, J. M., & Koo, S. M. (2020). Influence of annealing atmosphere on the characteristics of $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ nn heterojunction diodes. *Materials*, 13(2), 434.
- Vaca, D., Yates, L., Nepal, N., Katzer, D. S., Downey, B. P., Wheeler, V., ... & Kumar, S. (2020, July). Thermal Conductivity of β - Ga_2O_3 Thin Films Grown by Molecular Beam Epitaxy. In *2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)* (pp. 1011-1016). IEEE.
- Bar-Cohen, A., Albrecht, J. D., & Maurer, J. J. (2011, October). Near-junction thermal management for wide bandgap devices. In *2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Jian, Z., Sayed, I., Liu, W., Mohanty, S., & Ahmadi, E. (2021). Characterization of MOCVD-grown AlSiO gate dielectric on β - Ga_2O_3 (001). *Applied Physics Letters*, 118(17), 172102.
- Singh, A. K., Gupta, M., Sathe, V., & Katharria, Y. S.

- (2021). Effect of annealing temperature on β -Ga₂O₃ thin films deposited by RF sputtering method. *Superlattices and Microstructures*, 156, 106976.
11. Makeswaran, N., Battu, A. K., Deemer, E., & Ramana, C. V. (2020). Crystal Growth and Structure-Property Optimization of Thermally Annealed Nanocrystalline Ga₂O₃ Films. *Crystal Growth & Design*, 20(5), 2893-2903.
12. Eklund, P., Sridharan, M., Singh, G., & Böttiger, J. (2009). Thermal Stability and Phase Transformations of γ -/Amorphous-Al₂O₃ Thin Films. *Plasma processes and polymers*, 6(S1), S907-S911.
13. Zhang, L., Jiang, H. C., Liu, C., Dong, J. W., & Chow, P. (2007). Annealing of Al₂O₃ thin films prepared by atomic layer deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(12), 3707.
14. Hirose, M., Nabatame, T., Yuge, K., Maeda, E., Ohi, A., Ikeda, N., ... & Kiyono, H. (2019). Influence of post-deposition annealing on characteristics of Pt/Al₂O₃/ β -Ga₂O₃ MOS capacitors. *Microelectronic Engineering*, 216, 111040.
15. 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.
16. Patel, S. L., Chander, S., Purohit, A., Kannan, M. D., & Dhaka, M. S. (2018). Influence of NH₄Cl treatment on physical properties of CdTe thin films for absorber layer applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 123, 216-222.

접수일: 2022년 6월 7일, 심사일: 2022년 6월 17일,
게재확정일: 2022년 6월 23일