


# 후열 처리에 따른 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC 이종접합 다이오드 특성 분석

이영재, 구상모 

광운대학교 전자재료공학과

## Characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC Heterojunction Diode with Annealing Process

Young-Jae Lee and Sang-Mo Koo

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

(Received October 22, 2019; Revised December 4, 2019; Accepted December 24, 2019)

**Abstract:** Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-type 4H-SiC heterojunction diodes were fabricated by RF magnetron sputtering. The optical properties of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and electrical properties of diodes were investigated. I-V characteristics were compared with simulation data from the Atlas software. The band gap of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was changed from 5.01 eV to 4.88 eV through oxygen annealing. The doping concentration of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was extracted from C-V characteristics. The annealed oxygen exhibited twice higher doping concentration. The annealed diodes showed improved turn-on voltage (0.99 V) and lower leakage current (3 pA). Furthermore, the oxygen-annealed diodes exhibited a temperature cross-point when temperature increased, and its ideality factor was lower than that of as-grown diodes.

**Keywords:** Gallium oxide, Silicon carbide, Heterojunction, Diodes, Oxygen annealing

### 1. 서론

고에너지 밴드갭 소재는 실리콘 대비 고주파, 고전력 고온용 반도체 소자에 대한 적용이 가능한 우수 소재이다 [1,2].

그중, 산화갈륨(gallium oxide)은 산화물 반도체로 큰 밴드갭(~4.9 eV)와 높은 임계전압(~8 MV/cm)을 가진다. 또한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 Deep UV light (~250 nm)를 감지하는 재료로 각광받고 있으며 열/화학적 안정성을 갖는다 [3-5].

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 성장 조건에 따라  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , 그리고  $\epsilon$ -phase로 총 다섯 가지의 상이 존재한다. 이 중  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 monoclinic 구조로서 화학/열역학적으로 가장 안정

된 형태로 존재한다. 또한 HVPE, MBE, RF sputter 등 여러 공법을 통해 성장 가능하다. 여러 상들은 저온 열처리를 통해 얻을 수 있으며, 고온 열처리를 통해서 가장 안정적인 beta phase로 쉽게 변환할 수 있다. 또한 도핑을 하지 않은 자연적 도핑 농도가  $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이고 n 타입 특성을 가질 수 있다. Sn, Si 또는 Ge에 의한 도핑에 따라 자유 이동 전자 농도를 조절할 수 있다 [6-11].

그러나 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 상용화하기에는 아직 많은 연구가 필요하다. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 실리콘(~1.5 W/cm<sup>2</sup>·°C) 대비 낮은 열전도율(~0.5 W/cm<sup>2</sup>·°C)을 가지고 p 도핑 공정의 어려움이 있다. 그러므로 높은 열전도도와 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막과 낮은 격자 불일치를 가지는 다른 반도체 소재를 연구하는 것이 중요하다 [12].

탄화규소(silicon carbide)는 규소(Si)와 탄소(C)의 강한 공유결합으로 이루어진 화합물로 열적 안정성, 부식 저항성, 가벼움이 있어 고온용 소자에 널리 사용되어 왔다. SiC의 열전도율은 ~4.6 W/cm<sup>2</sup>·°C로 Si보다 약 3배 이상 높다. 또한, 4H-SiC의 격자 구조와(a = b =

✉ Sang-Mo Koo; smkoo@kw.ac.kr

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.  
 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.

3.097 Å)와  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 격자구조( $a = 12.23$  Å,  $b = 3.04$  Å)로 이루어져 있고 이들의 격자 불일치 정도는 ~2% 미만이다 [13-15].

본 연구에서, 우리는 n 타입 4H-SiC 기판 위에 RF sputter로  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막을 증착하여 이종접합 다이오드를 제작하였다. 그리고 산소 열처리에 따른  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 박막의 특성 변화를 확인하고 그에 따른 전기적 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1(a)는  $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$  이종접합 다이오드 구조이다. Epi layer의 도핑 농도는  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , substrate는  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 인 4H-SiC 웨이퍼를 사용하였다. 그리고 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )와 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )를 4 : 1로 혼합한 SPM 용액을 통해 기판을 클리닝 하고 buffered oxide etch 용액(BOE)을 사용하여 native  $\text{SiO}_2$ 를 제거하였다. 음극 형성을 위해 전자빔 증착장비를 사용하여 120 nm 두께의 니켈(nickel)을 증착하였다. 또한 급속 열처리

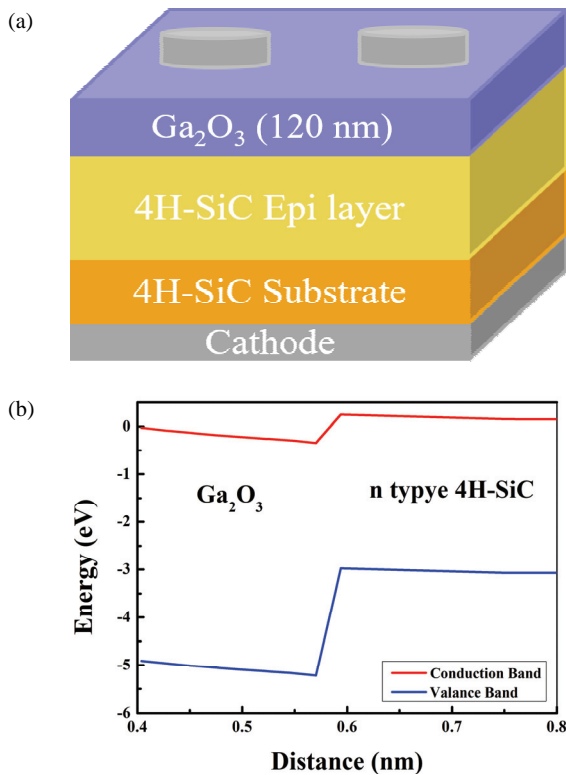
장비를 사용하여, 950°C인 질소 분위기에서 10분간 열처리를 통해 MS 접합을 오믹화하였다. RF 스퍼터를 이용하여  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막을 4H-SiC 위에 증착하였다. 스퍼터 파워는 150 W이고 2인치 타겟을 사용하였다. Ar 가스는 4.5 sccm이 주입되었다. 챔버 기압은 30 mTorr 이고 증착시간은 90분으로 진행하였으며, 120 nm 두께의 박막을 증착하였다. 증착된  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막을 산소 분위기에서 40분 동안 800°C로 열처리를 하였고, 이후 양극으로는 전자빔 증착장비를 사용하여 150 nm 두께의 니켈을 증착하였다. 그림 1(b)는 시뮬레이션을 통해 추출한  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 와 4H-SiC 계면의 에너지 밴드 구조이다.  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 도핑농도는  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 로 가정하여 진행하였다. 두 재료의 이종접합을 통해 가전자대와 전도대의 offset은 2.11 eV과 0.55 eV로 형성되는 것을 확인하였다. 양극에 순방향 전압이 인가될 때, 4H-SiC에 존재하는 전자들이  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 로 넘어가기 쉽다. 하지만 역방향 전압의 경우, 0.55 eV의 장벽높이에 의해  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 에 존재하는 전자들이 4H-SiC로 이동하기 어렵다. 따라서 순방향 전압이 인가될 때의 전류가 역전류보다 큰 것을 알 수 있다.

재료적 성질 분석에서, 산소 후열 처리 유무에 따른  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 밴드갭 변화를 확인하기 위해 파장별 투과도를 측정하였다. 또한 전압에 따른 커패시턴스를 측정하여 공식을 통해 도핑 농도를 추출하여 비교하였다. 전기적 성질을 분석하기 위해 전류-전압을 측정하였고 온도에 따른 전류량 변화를 확인하였으며 다이오드의 이상 계수를 추출하여 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 재료적 성질

그림 2(a)는  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  샘플의 파장별 투과율을 측정 한 스펙트럼 그래프이다. 처음 측정값 설정 시, 4H-SiC 기판을 측정한 투과도를 레퍼런스로 설정하였고 최대 크기의 투과도를 기준으로 표준화한 투과도를 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  박막의 밴드갭 에너지에 대응되는 220 nm 파장대의 부근에서는 강한 광흡수 현상으로 인해 투과율이 크게 감소하였으며, 275 nm 이상의 파장에서는 0.8 이상의 높은 투과율을 보였다. As-grown의 투과도가 후열처리 공정을 한 샘플보다 약 11% 더 큰 것을 확인하였다. 그림 2(b)는  $(ahv)^2-hv$  그래프로, 직접 천이로 가정하고



**Fig. 1.** (a)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$  heterojunction diode structure and (b) energy band diagram.

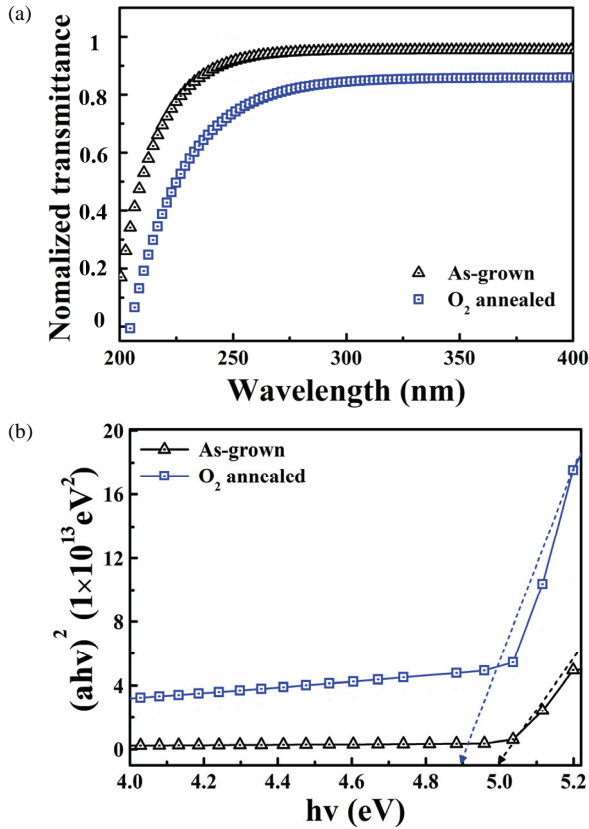


Fig. 2. (a) Optical transmittance spectra of As-grown and annealed samples and (b) the plot of  $(\alpha hv)^2-hv$ .

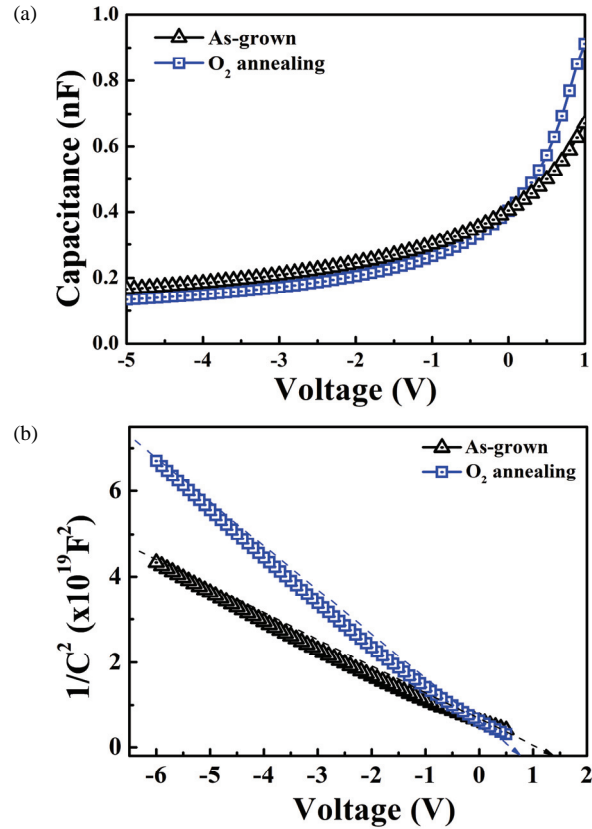


Fig. 3. (a) Typical capacitance-voltage characteristics and (b)  $1/C^2-V$  plot of  $Ga_2O_3/4H-SiC$  heterojunction diodes.

에너지 밴드 갭을 계산하여 추출하였다. a는 박막의 흡수 계수로,  $a = \ln(100/T)/d$ 이다. T는 투과율, d는 박막의 두께(120 nm)이며  $hv$ 는 광자에너지이다. 이때 샘플의 에너지 밴드갭은  $(\alpha hv)^2-hv$ 의 그래프에서 직선 구간의 접선을 연장한  $(\alpha hv)^2=0$ 이 되는 지점인 x 절편의 광자에너지로 계산된다. 그 결과, As-grown의 샘플의 밴드갭은 5.01 eV이고 산소 후열처리 공정을 한 후의 밴드갭은 4.88 eV로 감소하였다.

그림 3은 커패시턴스와 전압에 따른 그래프로 1 MHz의 주파수로 측정하였으며, 100 kHz ~ 1 MHz 부분의 고주파의 경우 수치에 큰 변화가 없었으며, C-V 측정을 통해  $1/C^2-V$ 로 변환하고 식 (1)을 통해 기울기를 구하고 이를 통해  $Ga_2O_3$ 의 도핑 농도( $N_{D1}$ )를 추출하였다.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{qA^2} \frac{\epsilon_{Ga_2O_3} N_{D1} + \epsilon_{SiC} N_{D2}}{N_{D1} N_{D2} \epsilon_{SiC} \epsilon_{Ga_2O_3}} (\Phi_{bi} - V) \quad (1)$$

q: 전자의 전하량 =  $1.6 \times 10^{19}$  [C]

- A: 소자의 면적 [ $cm^2$ ]
- $\epsilon$ : 비유전율 =  $Ga_2O_3$  (10), 4H-SiC (9.7)
- $N_{D2}$ : 에피 도핑 농도 = Epi ( $5 \times 10^{16}$ ) [ $1/cm^3$ ]

As-grown의 도핑 농도는  $3 \times 10^{16} cm^{-3}$ 이고 산소 후열처리를 한 후의 도핑 농도는  $5 \times 10^{16} cm^{-3}$ 으로 추출되었다. 후열 처리를 한  $Ga_2O_3$ 의 농도가 1.5배 더 높은 것을 확인되었다. 그 이유는 산소 후열 처리를 통해  $GaO_x$  상이 monoclinic 상으로 변환되면서 주로 트랩으로 작용하고 전자의 전도와 관련이 깊은 산소 공공(oxygen vacancy)이 감소함과 관련이 있을 수 있다.

그림 4는 산소 분위기 후열처리에 따라 변화하는  $Ga_2O_3/4H-SiC$ 의 결정학적 특성 확인을 위한 XRD 측정 결과이다. 위 그림에서,  $Ga_2O_3$  (-201)와 (-401)면에 대하여 약  $24^\circ$ 와  $36^\circ$ 에서 분명한 peak이 보이며, 이는 monoclinic 구조의 결정면에 대응하는 결과이다. As-grown에서보다 산소 후열처리를 통해서 상대적으로 해당 결정면 peak의 크기가 커진 것을 확인하였다.

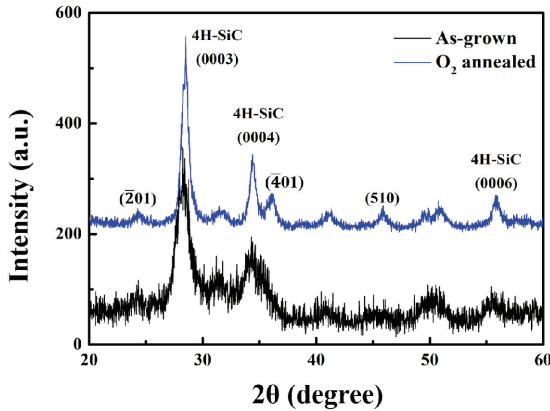


Fig. 4. 2 theta XRD spectrum of the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC.

3.1 전기적 성질

그림 5는 두 다이오드의 전압에 따른 전류를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서, 1.4~2.0 V 전압에서의 전류를 선형화하였을 때 x 절편을 구하여 문턱전압을 추출하였다. As-grown의 문턱전압은 ~1.16 V이고 산소 후열 처리한 다이오드는 ~0.99 V로 더 우수한 온-특성을 보였다. 또한 -3 V 기준에서 측정된 역전류의 크기는 열처리 전과 후 각각 ~1.7 nA와 ~3 pA로서, 열처리를 통해 약 500배 이상 누설전류가 감소함을 확인하였다. 순방향 전압의 경우, 후열 처리를 한 다이오드가 더 큰 전류량을 가진다. 이것은 열처리에 의한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 도핑농도 변화의 영향에 기인한다.

그림 6은 온도에 의해 흐르는 전류량 변화를 측정하

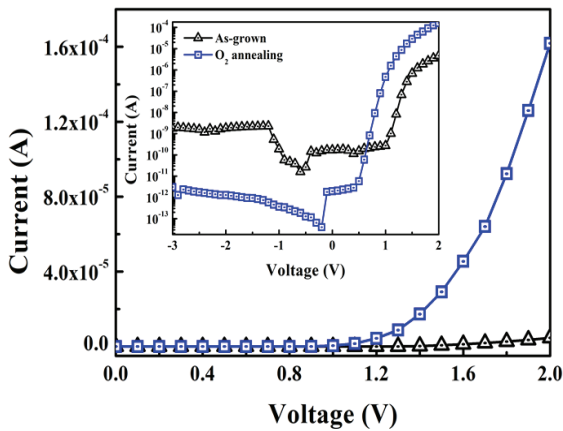


Fig. 5. Typical current-voltage characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC heterojunction diodes.

여 그래프로 나타낸 것이다. 두 다이오드를 25~175°C의 온도를 50°C씩 증가시키며 측정하였다. 그림 5(a)의 그림을 보면 알 수 있듯이, 온도가 높을수록 As-grown의 전류 그래프가 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 온도가 증가함에 따라 문턱전압이 낮아지고 전류량은 커지는 것을 확인하였다.

하지만 그림 6(b)에서는 특전 전압 부근에서 온도가 높을수록 전류량이 감소하여 교차되는 TCP (temperature cross point)가 확인되었다. 1.2 V 이하의 전압에서 가장 높은 온도인 175°C의 전류량이 가장 컸지만 전압이 증가하면서 전류량은 다른 온도에서의 전류량보다 작은 값을 가지게 된다. 또한 가장 낮은 전류량을 가졌던 25°C에서의 전류량이 1.6 V 이상에서 가장 큰 값을 가지는 것을 확인하였다.

이상 계수는 소자가 얼마나 이상적으로 동작하는지를 나타내주는 척도이다. 식 (2)는 이상 계수를 구하는 공식이며 계수가 1에 근접할수록 소자가 이상적으로 동작한다고 볼 수 있다.

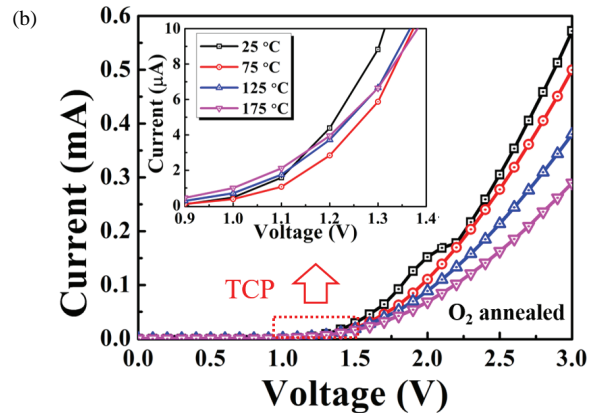
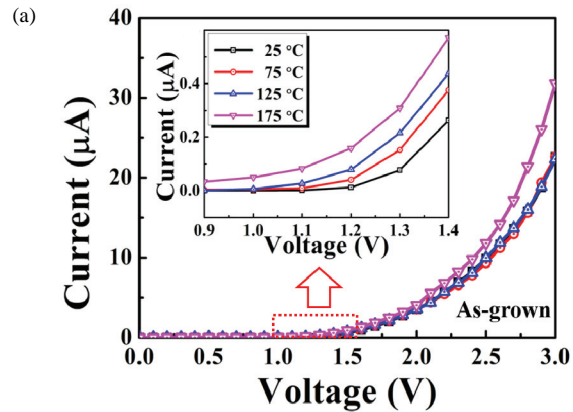


Fig. 6. I-V characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC heterojunction diodes on increasing temperature for (a) As-grown and (b) O<sub>2</sub> annealed.

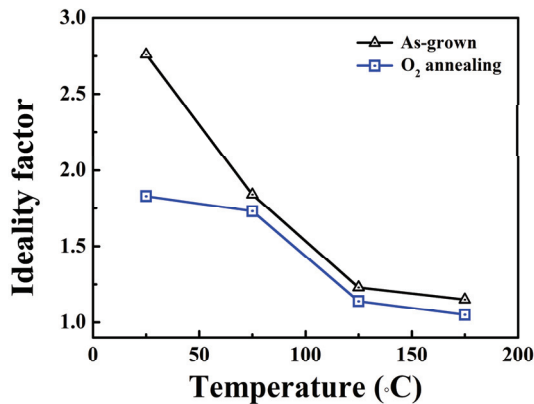


Fig. 7. Ideality factor of diodes at different temperatures.

$$\eta = \frac{q}{kT} \left( \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \right) \quad (2)$$

q: 전자의 전하량 =  $1.6 \times 10^{19}$  [C]

T: 절대 온도 [K]

J: 전류 밀도 [ $A/cm^2$ ]

그림 7은 두 다이오드가 온도에 따른 이상계수의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라 두 다이오드의 이상 계수의 크기가 작아지면서 1에 수렴함을 보였다. 상온에서 175°C까지 온도가 증가할 때, As-grown의 경우 2.74에서 1.25로 감소하였고 후 열 처리된 다이오드는 1.81에서 1.15로 감소하였다. 산소 열처리를 통해 온도가 높을수록 흐르는 전류량이 증가함을 알 수 있으며, 따라서 추출된 이상 계수 값의 감소에 영향을 주게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 4H-SiC 기판 위에  $Ga_2O_3$  박막을 증착하여 이중접합 다이오드를 제작하고 산소 후열처리에 따른 재료적, 전기적 특성을 비교 분석하였다.

산소 후열처리 공정을 통해 밴드갭이 5.01 eV에서 4.88 eV로 감소하였다. 도핑 농도는  $3 \times 10^{16} cm^{-3}$ 이었고, 열처리 후에는  $5 \times 10^{16} cm^{-3}$ 로 증가하였다. 산소 후열 처리를 한 다이오드의 누설전류는 As-grown보다 500배 낮은 3 pA를 가지고 on-state에서는 더 큰 전류량을 가졌다. 온도가 증가함에 따라 As-grown의 전압에 따른 전류량은 증가하였다. 이것은 온도에 의한 페르미 레벨이 변화하여 전위장벽이 감소하는 영향에

기인한다. 산소 후열처리를 한 다이오드의 그래프에서는 특정 전압 범위를 기준으로 온도에 따른 전류량이 감소하여 교차되는 것을 볼 수 있다. 이는 온도가 커짐에 따라 격자 진동이 일어나 캐리어 이동도가 낮아져 저항이 커지는 것으로 판단된다. 이상 계수는 온도가 증가함에 따라 1에 수렴하는 크기를 가졌으며 산소 후열처리를 한 다이오드의 이상 계수가 더 작은 것을 확인하였다.

#### ORCID

Sang-mo Koo

<https://orcid.org/0000-0002-9827-9219>

#### 감사의 글

This work was supported by the This research was supported by the NRF (2017K1A4A3013716 and 2018 R1D1A1B07047515), the Technology Innovation Program (20003540) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) and Research Grant from Kwang-woon University in 2019.

#### REFERENCES

- [1] B. J. Baliga, *J. Appl. Phys.*, **53**, 1759 (1982). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.331646>]
- [2] J. A. Cooper, *Mater. Sci. Forum*, **389**, 15 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.389-393.15>]
- [3] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, E. B. Yakimov, S. J. Pearton, C. Fares, J. Yang, F. Ren, J. Kim, P. B. Lagov, V. S. Stoblunov, and A. Kochkova, *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 092102 (2018) [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5049130>]
- [4] F. Shi, J. Han, Y. Xing, J. Li, L. Zhang, T. He, T. Li, X. Deng, X. Zhang, and B. Zhang, *Mater. Lett.*, **237**, 105 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.012>]
- [5] L. Huang, Q. Feng, G. Han, F. Li, X. Li, L. Fang, X. Xing, J. Zhang, and Y. Hao, *IEEE Photonics J.*, **9** (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2731625>]
- [6] S. Nakagomi, T. Sakai, K. Kikuchi, and Y. Kokubun, *Phys. Status Solidi A*, **216**, 1700796 (2018) [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201700796>]
- [7] Z. Zhang, E. Farzana, A. R. Arehart, and S. A. Ringel, *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 052105 (2016) [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4941429>]

- [8] H. Altuntas, I. Donmez, C. Ozgit-Akgun, and N. Biyikli, *J. Vac. Sci. Technol., A*, **32**, 041504 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4875935>]
- [9] A. K. Saikumar, S. D. Nehate, and K. B. Sundaram, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q3064 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0141907jss>]
- [10] M. J. Tadjer, J. L. Lyons, N. Nepal, J. A. Freitas Jr., A. D. Koehler, and G. M. Foster, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q3187 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0341907jss>]
- [11] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, S. J. Pearton, F. Ren, A. V. Chernykh, P. B. Lagov, and T. V. Kulevoy, *APL Mater.*, **6**, 096102 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5042646>]
- [12] M. E. Ingebrigtsen, J. B. Varley, A. Y. Kuznetsov, B. G. Svensson, G. Alfieri, A. Mihaila, U. Badstübner, and L. Vines, *Appl. Phys. Lett.*, **12**, 042104 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5020134>]
- [13] H. Kim, S. Kyoung, T. Kang, J. Y. Kwon, K. H. Kim, and Y. S. Rim, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 10953 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c9tc02922b>]
- [14] J. A. Cooper, M. R. Melloch, J. M. Woodall, J. Spitz, K. J. Schoen, and J. Henning, *Mater. Sci. Forum*, **264**, 895 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.264-268.895>]
- [15] H. Bartolf, V. K. Sundaramoorthy, A. Mihaila, M. Berthou, P. Godignon, and J. Millan, *Mater. Sci. Forum*, **778**, 795 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.795>]