

에어로졸 증착법을 이용한 Ga₂O₃/4H-SiC 쇼트키 다이오드의 전기적 특성 분석

김지현¹, 김예진¹, 박승현¹, 박창준¹, 오종민¹, 신원호¹, 박철환², 구상모¹ 

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 광운대학교 화학공학과

초록: Ga₂O₃은 넓은 밴드갭과 높은 항복 전계를 바탕으로 차세대 전력반도체 소재로 주목받고 있으며, 특히 4H-SiC 기판과의 접합을 통한 구조는 고온 및 고전압 환경에서도 우수한 전기적 특성을 발현할 수 있다. 그러나 Ga₂O₃은 낮은 열전도도로 인해 열 방출 한계를 가지며, 이를 보완하기 위한 열적 관리 기술 확보가 필요하다. 본 연구에서는 에어로졸 증착법을 이용하여 Ga₂O₃을 4H-SiC 기판에 증착한 후, Ga₂O₃ 박막 두께 변화(0.8, 1.1, 1.4 μm)에 따른 쇼트키 다이오드의 전기적 특성과 열적 안정성을 평가하였다. 실험 결과, 박막 두께가 증가할수록 턴온 전압, 이상계수, 누설 전류, 항복 전압 등 주요 특성에 뚜렷한 변화를 보였으며, 특히 200°C의 고온 환경에서도 우수한 정류 특성과 낮은 누설전류를 통해 고온 안정성이 확보되었다. 또한 열이온 방출(thermionic emission) 모델을 통해 장벽 높이 및 이상계수의 온도 의존성을 정량적으로 해석하였다. 본 연구는 고열전도성 기판 기반 Ga₂O₃ 전력소자의 최적 설계 및 열적 신뢰성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

키워드: Ga₂O₃, 4H-SiC, 쇼트키 다이오드, 이종 접합

Electrical Characterization of Ga₂O₃/4H-SiC Schottky Diodes Using Aerosol Deposition Method

Ji-Hyun Kim¹, Ye-Jin Kim¹, Seung-Hyun Park¹, Chang-Jun Park¹, Jong-Min Oh¹,
Weon Ho Shin¹, Chulhwan Park², and Sang-Mo Koo¹

¹ Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

² Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

(Received June 13, 2025; Revised July 16, 2025; Accepted July 16, 2025)

Abstract: Ga₂O₃ is an ultra-wide bandgap semiconductor material that offers superior electrical properties for high-voltage power electronics but suffers from poor thermal conductivity compared to conventional semiconductors. To overcome this thermal limitation, we developed Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction Schottky barrier diodes that utilize the high thermal conductivity of SiC substrates. Using the aerosol deposition method, we successfully fabricated devices with different Ga₂O₃ film thicknesses (0.8-1.4 μm) and achieved exceptional electrical performance with the 0.8 μm device showing a specific on-resistance of 41 mΩ·cm² and a leakage current as low as 1.26 × 10⁻¹⁰ A/cm² while maintaining stable operation up to 200°C. The devices demonstrated breakdown voltages reaching 2,365 V and maintained excellent rectification ratios above 10¹⁰ even at elevated temperatures. All fabricated devices with different film thicknesses showed consistent high-temperature stability, confirming the effectiveness of the heterojunction approach. These results provide a viable pathway for developing thermally stable, high-performance power devices essential for next-generation electric vehicle and renewable energy applications

Keywords: Ga₂O₃, SiC, Schottky barrier diode, Heterojunction

✉ Sang-Mo Koo; smkoo@kw.ac.kr

Copyright ©2025 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.

1. 서론

고전력 및 고온 환경에서의 반도체 소자 응용을 위해서는 넓은 밴드갭을 지니는 반도체의 도입이 필수적이다. 산화 갈륨(gallium oxide, Ga_2O_3)은 전력반도체용 광대역 밴드갭(WBG) 재료로서 뛰어난 물성을 기반으로 주목받고 있는 소재이다. Ga_2O_3 은 높은 항복전계(8 MV/cm), 넓은 밴드갭(4.8 eV), 단결정 성장의 용이성으로 인해 다양한 고전압 전력 소자 구현에 적합하다 [1,2]. 그러나 Ga_2O_3 은 열전도도가 비교적 낮아(10~29 W/mK) 고온 작동 시 열 방출 특성의 개선이 요구된다. 최근에는 열 방출 성능 향상을 목적으로 탄화 규소(silicon carbide, SiC, 490 W/mK), 다이아몬드(diamond, 2,200 W/mK) 등의 고열전도성 기판 위에 Ga_2O_3 을 스퍼터(sputter), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition), 에어로졸 증착법(aerosol deposition method)과 같은 방법으로 증착하여 전기적 및 열적 특성을 동시에 확보하는 연구가 시도되고 있다 [3-6]. 쇼트키 다이오드 구조에서 Ga_2O_3 /SiC 이종접합은 높은 항복 전압과 우수한 누설 전류 특성을 구현할 수 있는 대안으로 제시되고 있다. 특히, 에어로졸 증착법은 미세한 분말을 반송 가스에 실어 고속으로 기판에 분사하여 고밀도의 박막 또는 두꺼운 후막까지 짧은 시간 내에 형성하는 공정으로 활용되고 있다. 공정은 상온에서 진행되므로 기판과 박막 간의 화학적 반응이 발생하지 않아 다양한 종류의 기판에 적용 가능하다. 또한, 증착 과정 중 출발 원료와 코팅층 간의 조성이 유지되므로 다양한 복합 화합물의 막 형성이 용이하다는 이점이 존재한다 [7,8]. 본 연구는 Ga_2O_3 박막을 4H-SiC 기판 위에 에어로졸 증착법으로 증착하였으며, 소자의 전기적 특성을 분석하였다. 또한, Ga_2O_3 박막 두께에 따른 소자의 전기적 특성을 평가함으로써 고전력 쇼트키 다이오드의 응용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

에어로졸 증착 시스템은 원료 분말이 담긴 에어로졸 챔버(aerosol chamber)와 박막 형성이 이루어지는 증착 챔버(deposition chamber)가 가스관으로 연결되는 구조로 구성되어 있다. 분말 입자는 에어로졸 챔버 내에서 반송 가스에 의해 증착 챔버로 이송되고, 노즐을 통해 가속되어 기판 표면에 충돌함으로써 박막을 형성하는 방식으로 증착이 이루어진다. 실질적인 증착 메커니즘은 명확히 밝혀지지 않았으나, 기판에 충돌하는 동안 미세 입자들의 운동에

Table 1. Parameters of aerosol deposition method.

Parameters	Conditions
Starting powder	Ga_2O_3
Amount of powder	100 g
Substrate	4H-SiC
Type of injected gas	N_2
Injected gas consumption	5 L/min
Size of nozzle orifice	$10 \times 0.4 \text{ mm}^2$
Deposition temperature	Room temperature
Vibration	300 rpm
Scanning number	3-5 scans
Working pressure	1.4 torr

너지는 기판과 입자, 입자들 간의 결합 에너지로 전환되어 치밀한 박막 형성을 유도한다.

본 연구에서는 원통형 Ga_2O_3 분말을 사용하였으며, 증착 시 기판은 증착 챔버 내 고정된 스테이지에 장착하고, 노즐과 기판의 간격은 0.5 mm로 유지하였다. 스테이지는 좌우 방향으로 120 mm/sec 속도로 이동시켜 박막을 증착하였다. 사용된 단일 노즐은 스테이지와 45도 각도를 이루며, orifice의 크기는 $10 \times 0.4 \text{ mm}^2$ 이다. 분말 공급기에는 진동기를 사용하여 분말의 유동성과 분산성을 개선하였으며, 분말은 5 L/min 유속의 시료의 반응성이 적은 질소 캐리어 가스로 에어로졸화되어 기판에 분사되었다. 4H-SiC 기판 위에 형성된 Ga_2O_3 박막의 두께는 alpha-step profiler으로 측정된 결과 800-1,400 nm임을 확인하였다. 표 1은 본 실험에서 사용된 에어로졸 증착법의 주요 증착 조건을 제시하였다. 캐소드 전극은 스퍼터를 사용하여 NiAl(2.6%) 증착 후, 급속 열처리 공정(rapid thermal anneal, RTA)를 이용하여 90초 동안 950°C에서 오믹 접합을 형성하였다.

전자빔 증착기(e-beam evaporator)를 활용하여 지름 450 μm , 두께 70 nm의 Ni를 증착하여 애노드 전극을 형성하였다. 박막 특성 변화를 분석하기 위해 X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM)를 사용하였다. 온도 의존 전기적 특성 측정을 위해 Keithley 4200 semiconductor parameter analyzer와 핫플레이트를 이용하여 25°C에서 200°C까지 I-V-T 특성을 측정하였다. 고전압 조건에서의 역방향 특성은 Keithley 2657A source meter를 이용하여 평가하였다. Ga_2O_3 박막의 항복전계 분석을 위하여 SILVACO TCAD의 ATLAS 시뮬레이터를 이용하여 설계를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 SiC 기판 위에 증착한 Ga₂O₃ 박막의 XRD 패턴이다. 관찰된 회절 피크 중 2θ = 35.7°에서 나타난 (0004) 피크는 4H-SiC 기판에 기인한 것으로 확인되었다. 박막에서는 β-Ga₂O₃ 상의 (-201), (-111), (-402), (402), (20-4) 면과 α-Ga₂O₃ 상의 (10-2), (110), (002), (112), (204), (116), (214) 면에 대응하는 회절 피크가 관찰되었다. 본 결과로부터 해당 박막은 β-Ga₂O₃ 및 α-Ga₂O₃ 상이 혼재된 혼합상(mixed phase) 구조를 가지는 것으로 확인되었다. β-Ga₂O₃ (COD 96-200-4988) 및 α-Ga₂O₃ (COD 96-153-8348, COD 96-101-0584)의 XRD 패턴은 각각 ICDD 패턴과 비교하여 상 일치 여부를 확인하였다. α-Ga₂O₃ (a = 4.983 Å, b = 4.983 Å, c = 13.433 Å, α = 90°, β = 90°, γ = 120°) 및 β-Ga₂O₃ (a = 12.214 Å, b = 3.037 Å, c = 5.798 Å, α = 90°, β = 103.83°, γ = 90°) 상의 격자 매개변수를 가짐을 확인하였다. 복수의 회절 피크가 관찰됨에 따라 박막은 다결정(polycrystalline) 구조를 가지며, 특정

면에 대한 우선성장방향은 관찰되지 않았다. 또한 α-Ga₂O₃ 및 β-Ga₂O₃ 외의 다른 상 또는 불순물에 기인한 피크는 검출되지 않았다.

그림 2는 서로 다른 스캔 횟수를 증착한 필름의 단면 형상을 SEM으로 관찰한 결과이다. SEM 단면 형상을 통해 제작한 코팅층이 서로 다른 스캔 횟수에 관계없이 성공적으로 성막된 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 에어로졸 입자는 증착 시 기판 표면에 충돌하면서 망치 효과(hammering effect)가 발생하고, 이 과정에서 입자들이 분쇄되어 높은 밀도의 치밀한 박막을 형성하게 된다 [9]. 기본적인 성막 원리를 고려할 때, 성막 시간이 짧았던 0.8 μm 두께 샘플의 경우 입자 간 공극이 크게 형성되어 충분히 치밀한 코팅층이 형성되지 않았을 것으로 예상된다. 반면 1.4 μm 두께 샘플은 큰 입자에 의해 발생한 에칭 효과(etching effect)가 기존의 조밀하지 못한 코팅층을 깎아내 고밀도의 코팅층 형성을 유도한 것으로 판단된다 [10]. 망치 효과에 의한 균일한 코팅층의 형성을 위하여 박막의 최소 두께는 0.8 μm 이상으로 설정하였다. 0.8 μm 이하의 박막 두께에서 망치효과가 충분히 발생하지 못해 분말이 깨지지 않음을 확인하였다.

그림 3(a)는 Ga₂O₃ 박막 두께(d_{Ga2O3})가 각각 0.8, 1.1, 1.4 μm인 Ga₂O₃/4H-SiC 쇼트키 다이오드의 순방향 I-V 및 온저항(specific on-resistance, R_{on,sp}) 특성을 나타낸다. 온저항은 각각 41, 53, 60 mΩ·cm²로 측정되었으며, Ga₂O₃ 박막 두께가 증가함에 따라 온저항이 증가하는 경향을 보였다. 1.7 μm의 Ga₂O₃ 박막 두께를 가지는 샘플의 경우, 온저항이 197 mΩ·cm²로 급격히 증가했다. 따라서 최대 박막 두께는 1.4 μm로 설정하였다.

그림 3(b)-(d)의 I-V-T 곡선은 열이온 방출(thermionic emission) 모델을 기반으로 해석하였다. 다이오드의 전류 밀도(current density, J)는 다음과 같은 식으로 표현된다:

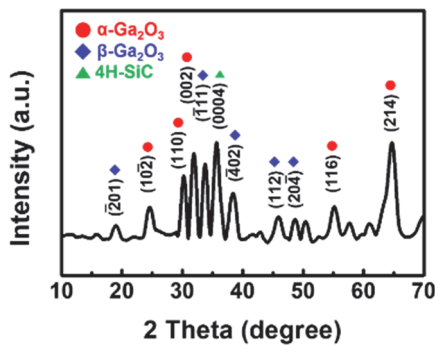


Fig. 1. XRD pattern of the Ga₂O₃ layer transferred onto the 4H-SiC substrate.

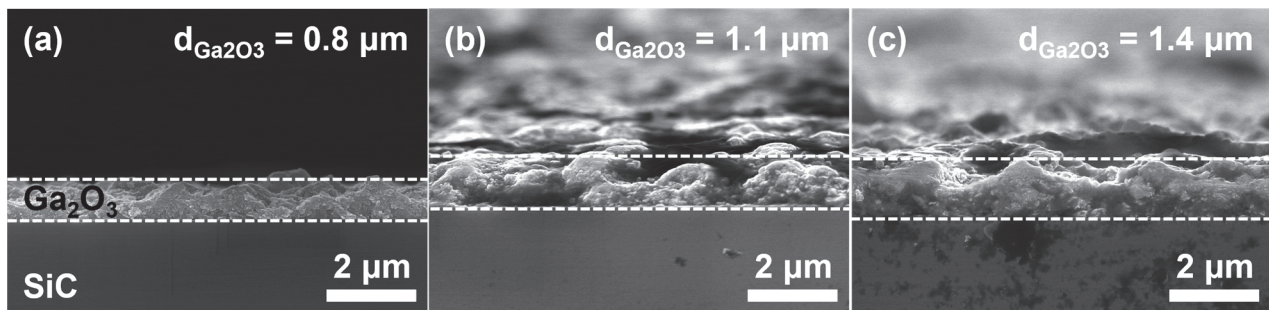


Fig. 2. Cross-sectional SEM image of Ga₂O₃/4H-SiC SBD with Ga₂O₃ thickness (d_{Ga2O3}) of (a) 0.8, (b) 1.1, and (c) 1.4 μm.

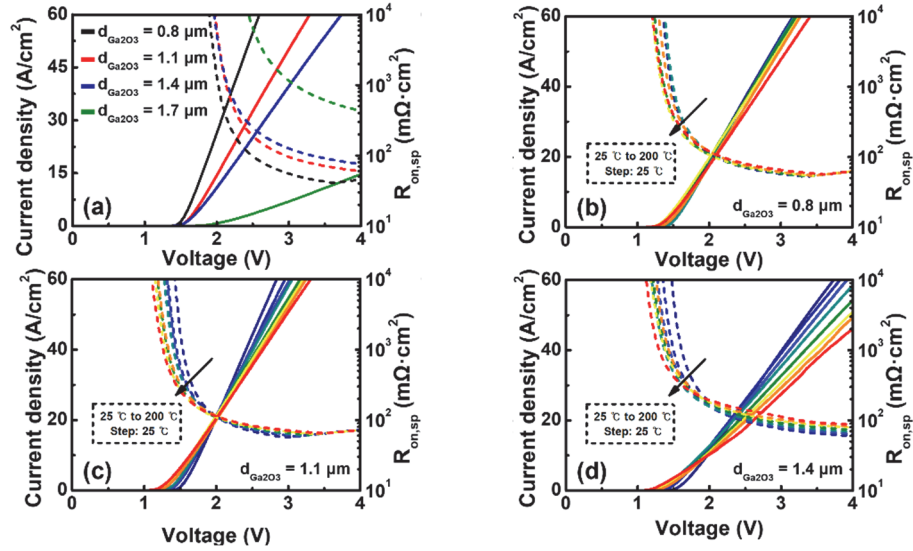


Fig. 3. (a) Forward I-V-specific on-resistance ($R_{on,sp}$) characteristics. Temperature-dependent linear scale forward characteristics for $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ SBD with Ga_2O_3 thickness ($d_{\text{Ga}_2\text{O}_3}$) of (b) 0.8, (c) 1.1, and (d) 1.4 μm from 25 to 200°C.

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$J_0 = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{nkT}\right) \quad (2)$$

여기서 J 는 전류 밀도, J_0 는 포화 전류 밀도, Φ_b 는 쇼트키 장벽 높이, n 은 이상계수, k 는 볼츠만 상수, A^* 는 Ga_2O_3 에 대한 리처드슨 상수($41.1 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$)이다.

$3kT/q < V$ 조건에서 식 (1)은 다음과 같이 단순화된다:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3)$$

식 (3)의 기울기와 y 절편으로부터 이상계수와 포화 전류 밀도를 도출할 수 있으며, 식 (2)를 변형한 식 (4)를 통해 쇼트키 장벽 높이를 계산한다:

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^*T^2}{J_0}\right) \quad (4)$$

그림 4는 $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8, 1.1, 1.4 \mu\text{m}$ 조건에서 온도별 쇼트키 장벽 높이 및 이상계수의 변화를 나타낸다. 25°C에서 200°C로 온도가 증가함에 따라, 쇼트키 장벽 높이는 $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8, 1.1, 1.4 \mu\text{m}$ 를 갖는 소자 각각에 대해 0.98 - 1.57, 0.98 - 1.52, 0.97 - 1.49 eV로 점차 증가하였다. 이는 접촉 계면의 비균일성에 기인한 것으로 판단된다 [11,12]. 낮은 온도에서는 상대적으로 낮은 쇼트키 장벽 높이를 갖는 영역을 통해 전류가 흐르기 쉬워 n 이 증가하고, 고온에서

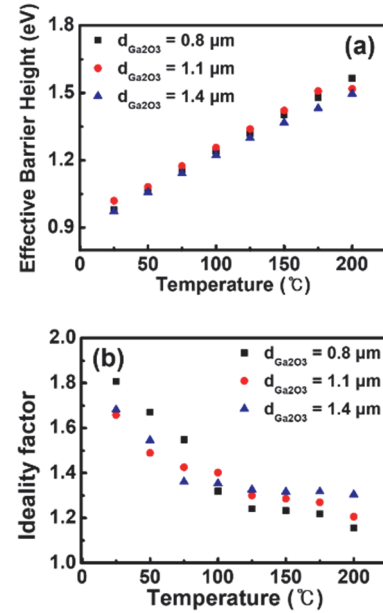


Fig. 4. Temperature dependent (a) Φ_b and (b) ideality factor for $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ SBDs.

는 높은 쇼트키 장벽 높이를 통한 전류 이동이 지배적으로 나타나며 이상계수가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 턴온 전압(V_{on}) 감소와 함께 관찰된 이상계수의 온도 의존성과 일치한다.

그림 5는 25°C에서 200°C까지 온도 상승에 따른 순방향

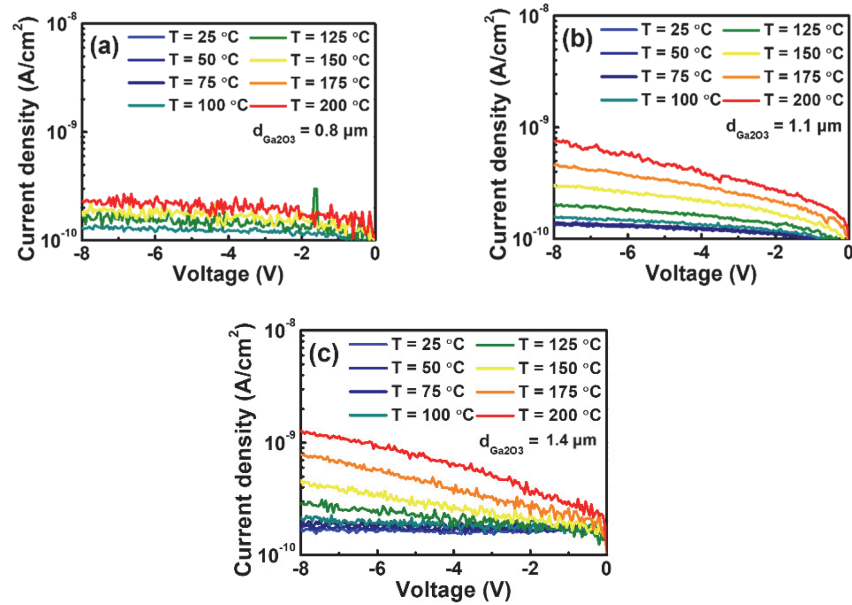


Fig. 5. Temperature-dependent reverse characteristics for Ga₂O₃/4H-SiC SBDs with Ga₂O₃ thickness ($d_{\text{Ga}_2\text{O}_3}$) of (a) 0.8, (b) 1.1, and (c) 1.4 μm from 25 to 200°C.

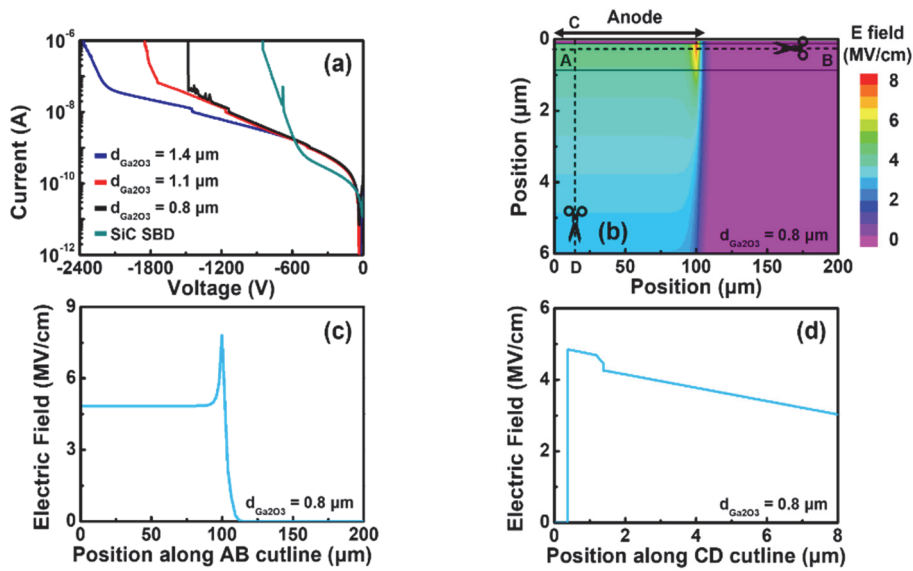


Fig. 6. (a) Reverse I-V characteristics for the 4H-SiC SBD, Ga₂O₃/4H-SiC SBDs with $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8, 1.1,$ and $1.4 \mu\text{m}$. (b) Simulated electric field distribution of the diode with $BV = 2.36 \text{ kV}$ and $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8 \mu\text{m}$ simulated electric field profile for cutlines along (c) AB and (d) CD.

및 역방향 전류 특성 변화를 나타낸다. 온도 증가 시 $\pm 3 \text{ V}$ 에서의 정류비(rectification ratio)는 각각 5.5×10^{11} , 4.2×10^{11} , 2.5×10^{11} 에서 시작하여, 200°C에서는 1.1×10^{11} , 7.5×10^{10} , 3.6×10^{10} 으로 감소하였다. 이는 온도 상승으

로 인한 누설 전류 증가에 기인한다. 또한, I-V 곡선의 선형 영역을 기반으로 도출한 턴온 전압은 온도 증가에 따라 각각 1.45, 1.50, 1.57 V에서 1.35, 1.25, 1.25 V로 감소하였다. 이는 고온에서 전자 에너지 증가에 따른 효과로 해석

된다. -5 V 바이어스에서, $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8, 1.1, 1.4 \mu\text{m}$ 소자의 누설 전류는 25°C 에서 각각 $1.26 \times 10^{-10}, 1.29 \times 10^{-10}, 1.64 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 였으며, 200°C 에서는 각각 $2.10 \times 10^{-10}, 4.48 \times 10^{-10}, 7.65 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 로 증가하였다. 이는 Ga_2O_3 박막의 두께 증가에 따라 누설 전류도 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 Ga_2O_3 의 낮은 열전도도에 기인할 수 있다. 고온에서 누설 전류 증가가 Ga_2O_3 쇼트키 다이오드에 비해 상대적으로 적은 것은 4H-SiC 기판의 높은 열전도도로 인해 낮은 열저항이 형성되기 때문이다. Chatterjee 등의 연구에 따르면, 다이아몬드가 통합된 $10 \mu\text{m}$ 및 $100 \mu\text{m}$ 두께의 Ga_2O_3 기판에서 열 방출 특성을 비교한 결과, $10 \mu\text{m}$ 소자의 열저항이 $100 \mu\text{m}$ 소자에 비해 약 5배 낮은 것으로 보고된 바 있다 [13].

그림 6(a)는 $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ 및 4H-SiC 쇼트키 다이오드의 역방향 I-V 특성을 비교한 결과를 나타낸다. $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3}$ 가 각각 $0.8, 1.1, 1.4 \mu\text{m}$ 인 $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ 쇼트키 다이오드의 항복 전압은 각각 약 $1,480 \text{ V}, 1,850 \text{ V}, 2,365 \text{ V}$ 로 추출되었으며, 비교 대상으로 사용한 4H-SiC 쇼트키 다이오드는 상대적으로 낮은 약 850 V 의 항복 전압을 보였다. $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8 \mu\text{m}$ 구조의 $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ 쇼트키 다이오드에 대해 Silvaco TCAD 시뮬레이션을 통해 전기장 분포를 분석하였다. 그림 6(b)는 약 2.3 kV 의 역바이어스에서 전기장 분포의 컨투어 플롯을 나타낸다. 그림 6(c)와 (d)는 각각 AB 및 CD 절단선을 따라 측정된 전기장 분포를 보여준다. 항복 전압 조건에서 애노드 금속/ Ga_2O_3 계면에서의 전기장은 약 4.8 MV/cm 에 도달하며, 애노드 가장자리에서는 약 8 MV/cm 의 피크 전기장이 형성되어 해당 부위가 항복 발생 위치임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ 쇼트키 다이오드의 전기적 특성을 Ga_2O_3 박막 두께 $0.8\sim 1.4 \mu\text{m}$ 범위에서 분석하고, 전하 수송 메커니즘을 고찰하였다. $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3}$ 값은 이상계수, 온 저항, 정류비 등 주요 전기적 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 실온에서의 장벽 높이는 약 0.98 eV 로 측정되었다.

저전압 영역에서는 열적으로 생성된 고유 전하 캐리어가 순방향 전류를 지배하였고, 이를 통해 전극- Ga_2O_3 계면의 장벽 특성을 분석하였다. 고온 구동 시, $d_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 0.8 \mu\text{m}$ 소자의 턴온 전압은 1.3 V 까지 감소하고 이상계수는 증가하였으며, $\pm 3 \text{ V}$ 에서의 정류비는 약 10^{11} 수준으로 감소하였다. 본 연구에서는 $\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ 쇼트키 다이오드

의 고온, 고전압 특성에 박막 두께가 미치는 영향을 확인하였으며, 이는 향후 고전력 응용분야의 소자 설계 및 최적화 연구에 활용될 수 있을 것이다.

ORCID

Sang-Mo Koo

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

감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Development Program - Development of High-Quality 6-inch & 8-inch multi Epi Growth Technology with Improved Interface Defects for SiC Power Semiconductors for the Application of Power Conversion Devices for Electric Vehicles (RS-2024-00401983) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea), Breath Self-Powered Human Interface Sensing System Laboratory (RS-2024-00415922) funded by the National Research Foundation (NRF) and also funded by Kwangwoon University in 2025.

REFERENCES

- [1] M. Orita, H. Ohta, M. Hirano, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 4166 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1330559>
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 013504 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.3674287>
- [3] M. H. Wong, Y. Morikawa, K. Sasaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 193503 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4966999>
- [4] A. J. Green, K. D. Chabak, M. Baldini, N. Moser, R. Gilbert, R. C. Fitch, G. Wagner, Z. Galazka, J. McCandless, A. Crespo, K. Leedy, and G. H. Jessen, *IEEE Electron Device Lett.*, **38**, 790 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2694805>
- [5] T. Kim, S. I. Park, C. Song, H. Lee, and J. Cho, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **191**, 122864 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122864>
- [6] S. Kim, M. Y. Cho, I. S. Kim, W. J. Kim, S. Park, S. Baek, J. M. Oh, and S. W. Kim, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1900359 (2019).

- doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201900359>
- [7] C. W. Kim, J. H. Choi, H. J. Kim, D. W. Lee, C. Y. Hyun, and S. M. Nam, *Ceram. Int.*, **38**, 5621 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.04.003>
- [8] J. Akedo, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 1834 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x>
- [9] D. Hanft, J. Exner, M. Schubert, T. Stöcker, P. Fuierer, and R. Moos, *J. Ceram. Sci. Technol.*, **6**, 147 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00018>
- [10] J. G. Liang, E. S. Kim, C. Wang, M. Y. Cho, J. M. Oh, and N. Y. Kim, *Sens. Actuators, B*, **265**, 632 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.093>
- [11] R. T. Tung, *Phys. Rev. B*, **45**, 13509 (1992).
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.13509>
- [12] D. Hamri, A. Teffahi, A. Djeghlouf, A. Saidane, and A. Mesli, *J. Alloy. Compd.*, **763**, 173 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.336>
- [13] B. Chatterjee, K. Zeng, C. D. Nordquist, U. Singiseti, and S. Choi, *IEEE Trans. Compon., Packaging, Manuf. Technol.*, **9**, 2352 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2019.2923356>