


Guard Ring 구조에 따른 β -산화갈륨(β -Ga₂O₃) 전력 SBDs의 전기적 특성 비교

이훈기¹, 조규준², 장우진², 문재경¹ 

¹ 한국전자통신연구원 양자센서연구그룹

² 한국전자통신연구원 RF/전력부품연구그룹

Comparison of Electrical Properties of β -Gallium Oxide (β -Ga₂O₃) Power SBDs with Guard Ring Structures

Hoon-Ki Lee¹, Kyujun Cho², Woojin Chang², and Jae-Kyoung Mun¹

¹ Quantum Sensors Research Group, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 34129, Korea

² RF/Power Components Research Group, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 34129, Korea

(Received December 12, 2023; Revised January 3, 2024; Accepted January 4, 2024)

Abstract: This reports the electrical properties of single-crystal β -gallium oxide (β -Ga₂O₃) vertical Schottky barrier diodes (SBDs) with a different guard ring structure. The vertical Schottky barrier diodes (V-SBDs) were fabricated with two types guard ring structures, one is with metal deposited on the Al₂O₃ passivation layer (film guard ring: FGR) and the other is with vias formed in the Al₂O₃ passivation layer to allow the metal to contact the Ga₂O₃ surface (metal guard ring: MGR). The forward current values of FGR and MGR V-SBD are 955 mA and 666 mA at 9 V, respectively, and the specific on-resistance ($R_{on,sp}$) is 5.9 m Ω ·cm² and 29 m Ω ·cm². The series resistance (R_s) in the nonlinear section extracted using Cheung's formula was 6 Ω , 4.8 Ω for FGR V-SBD, 10.7 Ω , 6.7 Ω for MGR V-SBD, respectively, and the breakdown voltage was 528 V for FGR V-SBD and 358 V for MGR V-SBD. Degradation of electrical characteristics of the MGR V-SBD can be attributed to the increased reverse leakage current caused by the guard ring structure, and it is expected that the electrical performance can be improved by preventing premature leakage current when an appropriate reverse voltage is applied to the guard ring area. On the other hand, FGR V-SBD shows overall better electrical properties than MGR V-SBD because Al₂O₃ was widely deposited on the Ga₂O₃ surface, which prevent leakage current on the Ga₂O₃ surface.

Keywords: Gallium oxide (Ga₂O₃), Schottky barrier diode (SBD), Guard ring, Specific on-resistance ($R_{on,sp}$), Series resistance (R_s), Breakdown voltage

1. 서론

현재 상용화되고 있는 Si (실리콘) 기반의 전력반도체는 실리콘의 물리적 특성 한계로 인하여 저전력, 고효율, 고전압, 대전류, 경량화 등의 특성을 만족하지 못하고 있다 [1-9]. 따라서 실리콘 기반에 전력반도체를 대체하기 위해

✉ Jae-Kyoung Mun; jkmun@etri.re.kr

Copyright ©2024 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.

물성 특성이 우수한 소재를 이용하여 전력반도체 분야에 활용할 수 있게 개발 및 연구가 활발히 수행되고 있다. 전력반도체는 전력 변환이나 제어를 수행하는 데 사용되는 반도체 소자로 정의되며, 응용 소자에는 Diodes, MOSFETs, IGBT, BJT, Thyristor 등이 있다. 이와 같은 전력반도체 소자의 성능을 월등히 향상시키기 위해서 고려해야 할 첫 번째 사항은 넓은 밴드갭(wide band gap) 특성을 지니고 있어야 한다. SiC (탄화규소)와 GaN (질화갈륨)은 밴드갭이 넓은 뿐만 아니라 우수한 재료 특성으로 인해 활용도와 기술 개발 측면에서 상당한 성장을 이룬 반도체 소재이다. 그러나 최근 들어 탄화규소와 질화갈륨보다 에너지 밴드갭이 더 높은 ultra-wide band gap (UWBG) 반도체 소재가 전력반도체 시장에 주목받고 있으며, 새로운 연구 분야로 각광받고 있다 [1,10-13]. 그중에서 β -Ga₂O₃ (베타 산화갈륨)은 4.8~4.9 eV만큼 넓은 밴드갭을 가지고 있으며, 높은 항복 전계(E_{br} =6~8 MV/cm)와 우수한 전자운송 특성뿐만 아니라 용융 성장 방법(melt-growth method)으로 대면적 기판 제조가 가능한 장점을 가진다. 뿐만 아니라 에피텍셜 성장 및 소자 공정기술의 개발과 함께 기존 전력반도체 소재인 탄화규소와 질화갈륨 대비, 성능 향상과 제조 공정 비용 절감 효과와 같은 경제적인 측면에서도 중요한 이점을 제공한다. 산화갈륨은 열역학적 조건에서 여러 상(α , β , γ , δ , ϵ)이 존재하는데, 그중에서 베타 산화갈륨은 물리적 특성이 우수하고 가장 안정적인 열 특성을 지니고 있다. 베타 산화갈륨의 이러한 장점은 차세대 전력반도체 소재로 각광받고 있으며, 소자 성능 향상과 비용 효율성을 갖춘 고전력, 고내압 장치 응용 분야에 가장 적합할 것으로 기대되고 있다. 특히, 고온의 열악한 환경에서 원활한 동작 구현이 가능한 전력반도체를 비롯하여 고전력 스위칭 소자나 RF 전력소자, 단자판 광소자, 센서 등 [10,14,15] 다양한 응용분야에서 경쟁력을 가질 수 있기 때문에 일본을 중심으로 중국, 미국, 유럽 등 여러 반도체 산업 선진국에서 차세대 반도체 소재로 평가받고 있어 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다.

하지만 현재 산화갈륨은 탄화규소, 질화갈륨과는 달리 물리적 특성상 p형 도핑 구현이 어렵기 때문에 오로지 n형으로만 소자 제작을 해야 하는 실정이다 [2,10]. 따라서 n형 도핑으로만 소자를 제조하는 단점 때문에 수~수십 kV/수 A용 고전압/고전류용 전력반도체를 구현하기에는 많은 어려움이 있다. 그래서 산화갈륨 드리프트층을 두껍게 성장하여 항복 전압을 기하급수적으로 증가시켜 고전압용 소자를 제작하기도 하지만 trade-off 현상으로 인하여 낮은 정방향 전류값을 나타내게 된다. 또한, 다중 에지 종단(multiple edge termination) 방법을 이용하여 적절한 두

께의 드리프트층만으로도 항복 전압 향상과 고전류값을 유지시키는 효과를 가져올 수 있지만 공정 복잡도가 증가하게 된다. 이러한 문제점들을 개선시키기 위해 제조 공정이 간단한 guard ring (가드링) 구조를 채택하는 방법이 있다. 전력반도체 소자 중 하나인 수직형 쇼트키 장벽 다이오드(vertical schottky barrier diodes, V-SBDs)는 anode (양극) 모서리에 전계가 집중되는데 에지 종단 방법뿐만 아니라, 가드링 구조를 이용하여 전계를 분산시켜 항복전압을 증가시키는 효과가 있다. Katsunori Ueno의 보고에 의하면 [14], n형 탄화규소 기판 상에 p형 탄화규소 가드링을 에피 성장을 하여 구현하였다. 이에 대한 결과로, 가드링이 없는 쇼트키 장벽 다이오드(SBD) 항복 전압은 약 240 V인 반면, p형 탄화규소로 가드링을 구현한 SBD는 550 V의 항복 전압을 나타내고 있다. 이 연구에 따르면 가드링이 있는 SBD의 경우 낮은 누설 전류로 인한 낮은 impact ionization rate와 가드링으로 인해 전계가 다소 감소되어 항복 전압이 증가했다고 보고하였다. David C. Sheridan은 [16] 4H-탄화규소 PN 기판에 다중 가드링 구조를 제작하고 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교 분석을 하였다. p⁺형 탄화규소 가드링을 각각에 PN 다이오드 별로 1~4개씩 배열한 후 이상적인 항복 전압값을 예측한 결과 가드링이 1개인 다이오드는 40%, 4개인 다이오드는 84%까지 근접하였다. 특히, 4개의 가드링으로 제작된 PN 다이오드에 항복 전압은 동일한 구조의 다이오드를 시뮬레이션을 수행한 결과와 비교하였을 때 1.2~1.3 kV 측정되어 두 결과가 일치하는 항복 전압을 나타내었다. 이에 대해, 표면 전하는 공핍층 확산을 강화하거나 이를 제한하여 항복 전압을 크게 변경할 수 있으며, 공핍 영역이 각각의 가드링에 도달하는 전위를 변경하기 때문에 전계를 분산시키는 효과를 나타낸다. 반면에, 산화갈륨은 p형 도핑을 할 수 없는 관계로 실리콘과 탄화규소 소자와 같이 전계 분산에 의한 항복 전압을 크게 향상시키기 어렵기 때문에 가드링 구조에 대한 제약이 상당히 많은 편에 속한다. 하지만 Chia-Hung Lin은 가드링 영역에 N⁺⁺형 이온 주입 공정과 필드 플레이트 구조를 이용한 결과를 보고하였다. 가드링이 없는 구조와 정방향 전압 특성과 항복 전압 측정 결과를 비교하였을 때 가드링이 없는 구조는 $R_{on}=5\sim 5.3\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, $V_{on}=1.8\text{ V}$, 항복 전압=750~1,380 V이며, 가드링 구조 SBD의 $R_{on}=4.7\sim 4.9\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, $V_{on}=1.5\sim 1.6\text{ V}$, 항복 전압=860~1430 V로 나타났다. 이 결과로 미루어 볼 때 이온 주입 공정은 정방향 전압 특성을 개선해 주는 역할을 하였으며, 항복 전압 증가는 주로 필드 플레이트에 의한 에지 종단 효과에 의해 개선되었다고 보고하고 있다 [17]. 이 밖에도, 이온 주입이 필요 없는 간단한 금속 가드링 방법으로

두께가 $1.5\ \mu\text{m}$, $0.2\ \mu\text{m}$ 간격으로 5개의 가드링을 배치하여 V-SBD 시뮬레이션을 수행한 결과 가드링이 없는 V-SBD는 $940\ \text{V}$ 인 반면, 가드링 구조를 채택한 V-SBD의 항복 전압은 $2,000\ \text{V}$ 를 얻었고, R_{on} 특성 저하도 없는 것으로 확인되었다. 이러한 원인은 가드링이 다중으로 배열된 구조에서 양극 종단 영역에 집중되는 전계를 분산시킴으로써 임계값 미만에 전계를 유지시켜 준다. 이 밖에도, 가드링의 개수와 간격에 따라 항복 전압이 감소 또는 증가하게 되어 실제로 SBDs를 제작할 때 최적화된 가드링 개수와 간격을 설정해야 한다 [18].

현재까지는 n형 특성만 지니고 있는 산화갈륨은 소자 제작에 많은 제약이 따르지만, 물리적 특성이 탄화규소와 질화갈륨보다 많은 장점을 가지고 있기 때문에 간단한 구조 변경만으로도 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 p형 가드링을 대체하기 위하여 베타 산화갈륨 웨이퍼 상에 형성한 금속 가드링(metal guard ring, MGR)과 박막 위에 형성된 금속 가드링(film guard ring, FGR) 구조의 전

류-전압 특성(I-V), specific 온-저항($R_{\text{ds,on}}$), 시리즈 저항(R_s), 항복 전압 등 전력소자의 주요 특성을 비교 및 평가하였다.

2. 실험 방법

베타 산화갈륨 FGR과 MGR V-SBDs 제조를 위하여 가장 먼저 수행하는 공정은 후면에 ohmic 형성을 위한 Ti/Au를 각각 $20\ \text{nm}/150\ \text{nm}$ 만큼 증착하였다. Ohmic 금속층을 증착한 후 질소(N_2) $3\ \text{slm}$, 450°C 온도에서 1분간 열처리하여 금속/반도체 alloy를 형성하였다. 그림 1(a), (b)는 패시베이션층(passivation layer)을 증착하지 않은 베타 산화갈륨 FGR, MGR V-SBDs 구조의 단면도이다. 모든 소자의 기판은 타무라에서 제공하는 기판을 사용하였으며, $650\ \mu\text{m}$ 정도의 두께를 가진 n⁺형 베타 산화갈륨 (001) 기판상에 하이드라이드 기상 에피 성장법(HVPE) 공

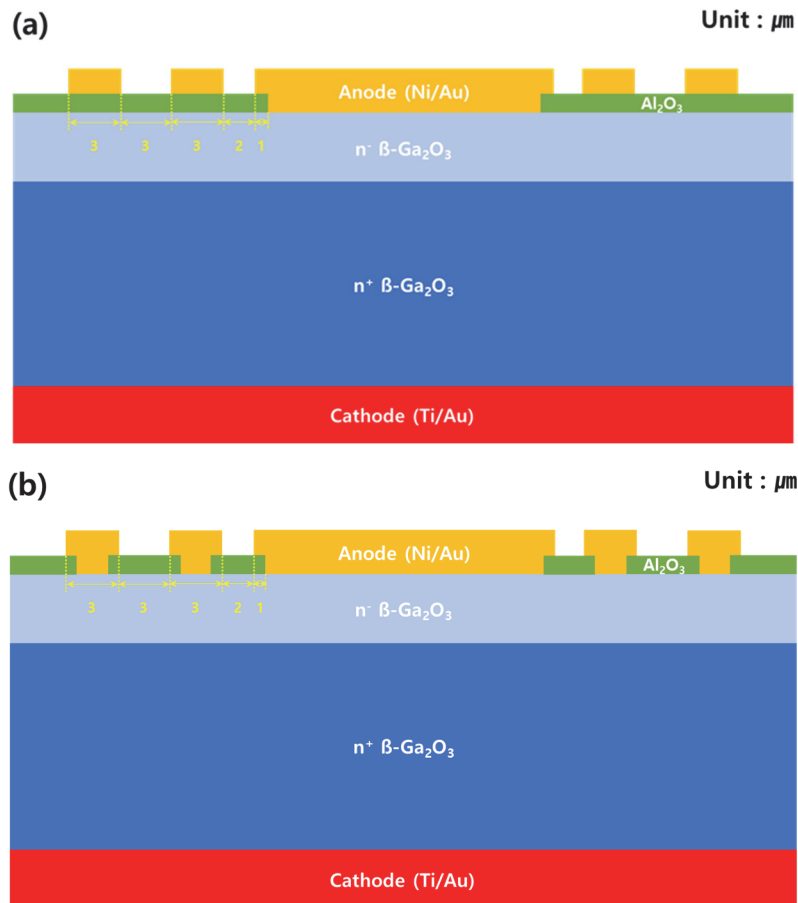


Fig. 1. Cross-sectional of the fabricated $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (a) FGR and (b) MGR V-SBDs.

정으로 트리프트층을 10 μm 두께만큼 에피 성장된 n⁻형 베타 산화갈륨 (001) 구조이다. 양극 종단 영역에 집중되는 전계장을 감소시키기 위해 ALD (atomic layer deposition) 를 이용하여 알루미늄(Al_2O_3)를 100 nm 두께만큼 증착하였다. 알루미늄의 임계 전계장은 일반적으로 50 \AA 보다 두꺼운 필름에서 10 MV/cm만큼 나타난다. 특히 ALD로 고품질 알루미늄 증착 시 10 \AA 두께에서 최대 30 MV/cm로 상당히 강화된 박막 특성을 구현할 수 있다 [19]. 그에 반면 실리콘 산화막(SiO_2)의 최대 임계 전계장은 10 MV/cm이다. 즉 0.1 μm 당 100 V만큼의 임계 전계장이 나타나야 하지만 증착 공정 중에 형성되는 결함들로 인해 도달하기가 어려운 단점이 있다 [20]. 그래서 베타 산화갈륨 표면에 바로 접촉하는 패시베이션층은 ALD를 이용하여 고품질 박막 증착과 더불어 임계 전계장이 높은 박막 특성이 중요한 요소이기 때문에 알루미늄을 증착하였다. 양극과 MGR V-SBDs의 가드링 패턴을 위해 유전체 비아 홀(Via hole)을 형성한 후 쇼트키 전극 금속인 Ni/Au를 각각 120 nm, 350 nm만큼 증착하여 리프트오프(lift-off) 공정을 수행하였다. 또한 양극 종단에 가해지는 전계장을 감소시켜 항복 전압을 증가시키려는 목적으로 두 번째 패시베이션층인 실리콘 산화막을 약 320 nm 증착 후 유전체 비아 홀을 형성하여 양극 영역을 개방한다. 이후, 전기 저항 감소와 측정 시 패드 프로빙을 용이하게 하기 위하여 Ti/Au 2차 금속을 증착하였다. 최종적으로 세 번째 패시베이션층인 질화규소(SiN_x)를 증착하여 수분이나 먼지 흡착 등 외부환경 영향을 최소화하고 측정 등 기타 소자 조작 과정에서 생길 수 있는 손상 등을 방지함으로써 소자의 안정성과 신뢰성 향상에 목적을 두었다 [21].

3. 결과 및 고찰

그림 2는 제작된 베타 산화갈륨 FGR과 MGR V-SBDs의 정방향 대전류(limit measurement: 1 A) 전류-전압 특성 곡선을 나타내고 있다. 두 소자의 전류-전압 특성을 비교하였을 때 FGR 구조의 전류량이 MGR 구조보다 월등히 높은 전류값을 나타내었으며, 각각 9 V에서 955 mA, 666 mA로 나타났다. 동일한 양극 면적비에 비해 큰 차이를 보이고 있는 전류량은 두 SBDs 가드링 구조의 차이점과 관련이 있을 것으로 예상되어, 이에 대한 정확한 분석을 소자의 구조에 따른 전기적 특성을 통해 비교 분석하였다.

그림 3은 베타 산화갈륨 MGR과 FGR V-SBDs 소자에 대한 $R_{on,sp}$ (접촉 저항) 결과를 나타내고 있다. 전력 스위칭 소자의 접촉 저항은 온-상태에서 전력 손실에 비례하

로 낮을수록 고효율 전력변환이 가능하다. 두 SBDs의 접촉 저항을 9 V 구간에서 각각 살펴보면, FGR 구조는 5.9 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, MGR 구조는 29 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 나타났다. 게다가 MGR V-SBD는 인가되는 전압이 증가할수록 접촉 저항이 증가하다가 결국엔 매우 불안정한 상태를 나타내고 있다. 따라서 정방향 전기적 특성을 살펴보면 MGR V-SBD는 금속과 반도체의 R_s (시리즈 저항)이 매우 높은 것을 유추할 수 있다. 양극의 쇼트키 접점은 반도체와 직렬로 연결되는데, 쇼트키 장벽 다이오드의 전류 흐름에 영향을 주는 시리즈 저항을 가지게 된다. 따라서 시리즈 저항은 쇼트키 장벽 다이오드를 분석하는 데 있어서 매우 중요한 파라미터 중

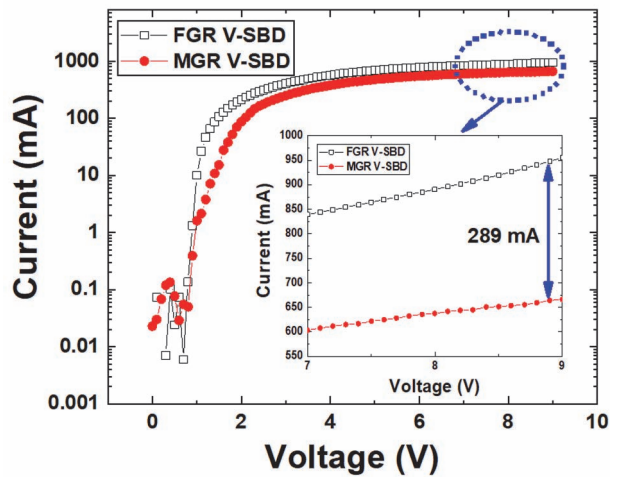


Fig. 2. Experimental semi-log forward I-V characteristics from the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FGR and MGR V-SBDs.

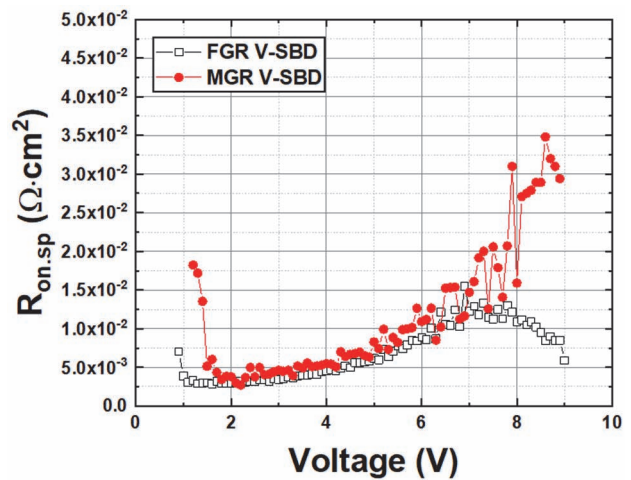


Fig. 3. Specific on-resistance ($R_{on,sp}$) results of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FGR and MGR V-SBDs.

에 하나이며, 다음 Cheung 함수를 이용하여 추출할 수 있다 [22].

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_S + n \frac{kT}{q} \quad (1)$$

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2)$$

그리고

$$H(I) = IR_S + nQ_b \quad (3)$$

그림 4는 Cheung 함수식을 이용해 추출된 $dV/d\ln(I)$ 와 $H(I)$ 곡선이며, 두 곡선에서 기울기를 나타내는 직선 영역은 시리즈 저항을 나타낸다. 식 (3)을 이용해 FGR와 MGR V-SBDs의 시리즈 저항을 추출한 결과 각각 6 Ω , 10.7 Ω , 수식 (1)에서는 4.8 Ω , 6.7 Ω 이 추출되었다. 두 수식을 통한 시리즈 저항은 FGR 구조가 낮게 나타났으며, 전류-전압 곡선에서도 전류값이 높게 측정된 결과를 미루어 볼 때 쇼트키 접합의 전압강하가 다소 낮은 것을 의미할 수 있다. 또한, 이런 차이는 전류-전압 곡선에서 오목한 부분(비선형 구간)은 인가된 바이어스에 따른 시리즈 저항, 계면층 및 계면 상태 등의 변화가 존재하기 때문에 파라미터에 영향을 주어 선형성에서 상당히 벗어난다. 이 중에서 시리즈 저항은 비선형 구간에서만 유효하는 파라미터이기 때문에 쇼트키 장벽 다이오드의 전류-전압 특성에 상당한 영향을 미치게 된다. 게다가, 쇼트키 접점의 계면상태를 확인할 수 있는 다이오드 이상지수(Ideality factor: n)를 추출한 결과 FGR 구조는 8.5, MGR 구조는 30이라는 큰 수치가 나타났다. 저전압 선형구간에서 열전자 방출식(thermionic emission)을 이용해 추출하였을 때 다이오드 이상지수는 두 소자 모두 약 1에 근접한 수치를 나타낸 반면, 비선형 구간에서의 높은 다이오드 이상지수는 인가되는 전압이 증가할수록 계면상태의 불안정성을 유추할 수 있다. 특히 MGR V-SBD는 매우 높은 다이오드 이상지수 값을 나타내고 있어 양호하지 않은 쇼트키 접합 상태가 원할한 전류 흐름을 방해하는 요소이기에 더욱 세밀한 분석이 필요하다. 이렇듯 쇼트키 접합 경계면 상태는 파라미터 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 하며, 소자 성능, 안정성 및 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다 [23-26].

그림 5는 베타 산화갈륨 FGR, MGR V-SBDs의 역방향 항복전압 특성 곡선이다. 역방향 전압을 인가하였을 때 누설전류 1 μA 부근의 전압을 항복전압으로 규정하고 그 결과를 살펴보았다. FGR 구조의 항복전압은 약 528 V 나타내는 데 비하여 MGR 구조를 사용할 경우 항복전압이 358 V

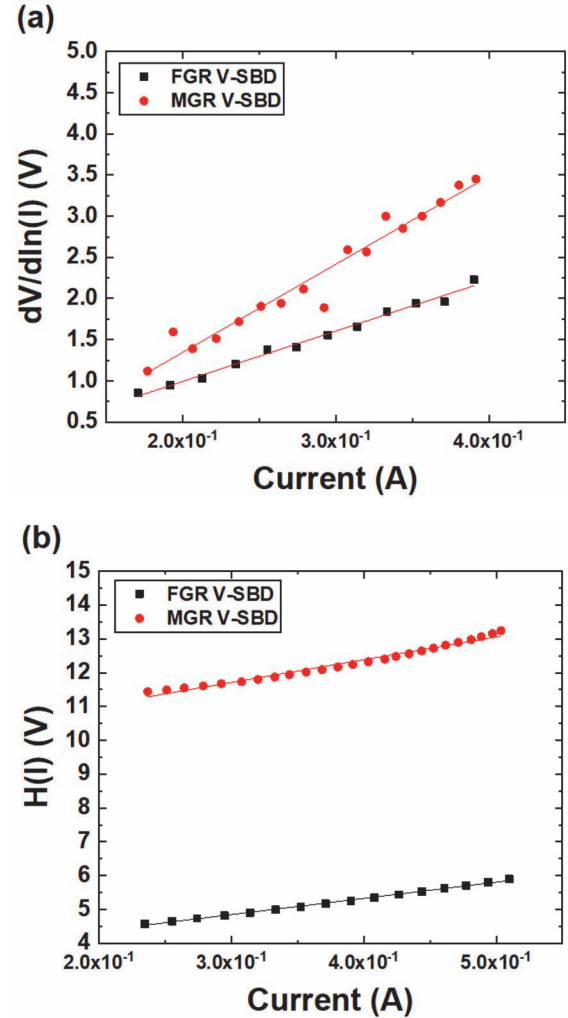


Fig. 4. Plot of (a) $dV/d\ln(I)$ versus I and (b) $H(I)$ versus I of the β - Ga_2O_3 on FGR and MGR V-SBDs.

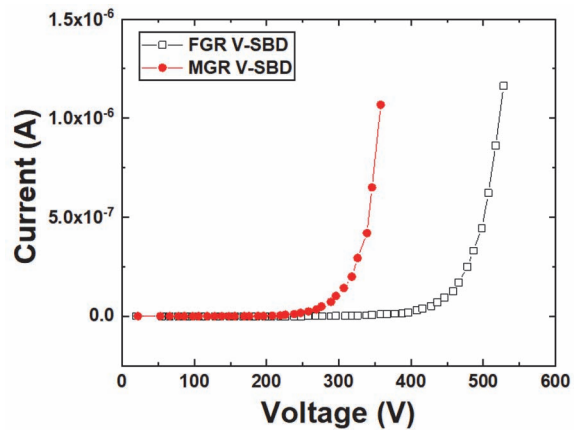


Fig. 5. The breakdown voltage curves of the β - Ga_2O_3 FGR and MGR V-SBDs.

로 매우 감소하였다. 베타 산화갈륨 MGR V-SBD의 항복 전압이 감소 원인으로는 베타 산화갈륨과 Ni이 쇼트키 접합으로 형성되어 있는 가드링 영역에 누설전류 발생이 원인이 될 수 있다. Ribhu Sharma [27]의 결과 보고에 따르면 쇼트키 접합 가드링에 개별적으로 역방향 전압을 인가하였을 때 누설전류가 최대 87%까지 감소하였으며, 항복 전압은 14% 증가하였다. 하지만 일정 전압 이상의 전압을 인가하였을 때 공핍 영역 폭이 과도하게 얇아짐으로써 터널링 현상에 의한 소자 파괴 현상이 나타나게 된다. 따라서 MGR V-SBD도 역방향 초기 누설전류 증가에 따른 항복 전압이 감소되는 현상이 나타나고 있다. 그에 반면, FGR V-SBD는 에지 종단으로 형성된 알루미늄 박막이 베타 산화갈륨 표면 전체에 증착되어 있고, 그 위에 일정한 간격으로 쇼트키 접합 가드링이 형성된 구조로써 박막 자체가 베타 산화갈륨 표면으로 흐르는 누설전류를 방지하는 것을 나타내고 있다 [28,29]. 또한, 누설전류가 감소한 만큼 전류 밀도가 증가하여 베타 산화갈륨과 쇼트키 접합 영역을 통해 흐르는 전류 밀도가 증가하여 원활한 전류 흐름에 기여할 수 있다 [29]. 일반적인 가드링 구조는 기판과 반대 타입의 물질을 사용하여 누설 전류 감소 효과를 극대화할 수 있다. 즉 n형 기판일 경우 가드링을 p형, p형 기판일 경우 n형을 가드링으로 사용하여 에지 종단에 가해지는 임계 전계장을 감소시켜 항복 전압을 낮추고, 양극에 흐르는 전류 밀도를 증가시킬 수 있다. 하지만 베타 산화갈륨은 현재까지 p형 제조가 불가능한 상태이기 때문에 p형 특성을 가지고 있는 소재를 이용하여 이종 접합으로 가드링을 형성할 수 있으나, 접합 상태 불량과 p형 소재의 결함 등으로 인해 또 다른 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 가드링 구조뿐만 아니라, 유사 구조를 설계를 통한 전기적 성능을 향상시키는 연구를 수행하여 향후 기존 전력 반도체보다 우수한 성능의 고전압 전력 스위칭 소자 개발을 위한 플랫폼으로 발전할 가능성을 높여야 한다 [30].

4. 결론

본 연구에서는 단결정 베타 산화갈륨 기판상에 하이드라이드 기상 에피 성장법(HVPE)으로 10 μm 성장된 에피드립트층에 박막 증착 후 금속 가드링 구조인 FGR V-SBD와 금속 가드링 구조인 MGR V-SBD를 제작하였다. FGR과 MGR 구조의 전류값은 9 V에서 955 mA, 666 mA, 접촉 저항은 5.9 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 29 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, Cheung 수식을 이용하여 추출된 비선형 구간에서 FGR 구조의 시리즈 저항은 6 Ω , 4.8 Ω , MGR 구조는 10.7 Ω , 6.7 Ω , 항복전압

은 528 V, 358 V 특성을 보였다. MGR V-SBD의 전기적 특성이 저하된 원인으로 역방향 누설 전류가 증가하는 원인으로 파악되었다. 반면 FGR 구조는 에지 종단에 증착된 알루미늄이 베타 산화갈륨 표면에 넓게 증착되어 있어 베타 산화갈륨 표면으로 흐르는 누설 전류를 방지하는 역할을 하기 때문에 전반적으로 MGR 구조보다 전기적 특성이 우수하게 나타났다. 이와 같이 소자 구조의 설계 최적화와 공정 기술의 향상은 향후 전기자동차, 산업기기, 철도, 신재생 에너지 분야 등 다양한 산업 분야에서 적용 가능한 산화갈륨 고전력 소자 기술의 발전에 핵심이 될 것으로 예상된다 [21].

ORCID

Jae-Kyoung Mun

<https://orcid.org/0000-0002-1849-2117>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(산업부)의 전략적핵심소재기술사업(과제번호: 10080736)과 교육부 산하 한국연구재단(NRF)의 지원(과제번호: NRF-2020M3H4A3081798)에 의하여 수행된 결과임을 밝혀 둡니다.

REFERENCES

- [1] D. A. Oulianov, R. A. Crowell, D. J. Gosztola, I. A. Shkrob, O. J. Korovyanko, and R. C. Rey-de-Castro, *J. Appl. Phys.*, **101**, 053102 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2696204>
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 034001 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/3/034001>
- [3] H. von Wenckstern, *Adv. Electron. Mater.*, **3**, 1600350 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.201600350>
- [4] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Carey IV, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011301 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5006941>
- [5] Z. Galazka, *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 113001 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aad7f8>
- [6] M. Higashiwaki and G. H. Jessen, *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 060401 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5017845>
- [7] J. L. Lyons, *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 05LT02 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aaba98>

- [8] S. J. Pearton, F. Ren, M. Tadjer, and J. Kim, *J. Appl. Phys.*, **124**, 220901 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5062841>
- [9] J. Zhang, J. Shi, D. C. Qi, L. Chen, and K.H.L. Zhang, *APL Mater.*, **8**, 020906 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5142999>
- [10] J. Y. Tsao, S. Chowdhury, M. A. Hollis, D. Jena, N. M. Johnson, K. A. Jones, R. J. Kaplar, S. Rajan, C. G. Van de Walle, E. Bellotti, C. L. Chua, R. Collazo, M. E. Coltrin, J. A. Cooper, K. R. Evans, S. Graham, T. A. Grotjohn, E. R. Heller, M. Higashiwaki, M. S. Islam, P. W. Juodawlkis, M. A. Khan, A. D. Koehler, J. H. Leach, U. K. Mishra, R. J. Nemanich, R.C.N. Pilawa-Podgurski, J. B. Shealy, Z. Sitar, M. J. Tadjer, A. F. Witulski, M. Wraback, and J. A. Simmons, *Adv. Electron. Mater.*, **4**, 1600501 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.201600501>
- [11] K. D. Chabak, J. P. McCandless, N. A. Moser, A. J. Green, K. Mahalingam, A. Crespo, N. Hendricks, B. M. Howe, S. E. Tetlak, K. Leedy, R. C. Fitch, D. Wakimoto, K. Sasaki, A. Kuramata, and G. H. Jessen, *IEEE Electron Device Lett.*, **39**, 67 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2779867>
- [12] K. J. Cho, J. K. Mun, W. Chang, and H. W. Jung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 78 (2020).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.1.78>
- [13] M. Orita, H. Ohta, M. Hirano, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 4166 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1330559>
- [14] K. Ueno, T. Urushidani, K. Hashimoto, and Y. Seki, *IEEE Electron Device Lett.*, **16**, 331 (1995).
doi: <https://doi.org/10.1109/55.388724>
- [15] J. K. Mun, K. Cho, W. Chang, H. W. Jung, and J. Do, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q3079 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1149/2.0151907jss>
- [16] D. C. Sheridan, G. Niu, J. N. Merrett, J. D. Cressler, C. Ellis, and C. C. Tin, *Solid-State Electron.*, **44**, 1367 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(00\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(00)00081-2)
- [17] C. H. Lin, Y. Yuda, M. H. Wong, M. Sato, N. Takekawa, K. Konishi, T. Watahiki, M. Yamamuka, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, *IEEE Electron Device Lett.*, **40**, 1487 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2927790>
- [18] J. H. Choi and H. Y. Cha, *Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **23**, 193 (2019).
doi: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.1.193>
- [19] H. C. Lin, P. D. Ye, and G. D. Wilk, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 182904 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2120904>
- [20] S. Li, J. Luo, and T. Ye, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **12**, 053006 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1149/2162-8777/acdl1ae>
- [21] J. K. Mun, K. Cho, W. Chang, H. Lee, S. Bae, J. Kim, and H. Sung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 201 (2019).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.3.201>
- [22] S. K. Cheung and N. W. Cheung, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 85 (1986).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.97359>
- [23] V. R. Reddy, V. Janardhanam, J. W. Ju, H. J. Yun, and C. J. Choi, *Solid State Commun.*, **179**, 34 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2013.11.011>
- [24] E. H. Rhoderick and R. H. Williams, *Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed.* (Oxford University Press, 1988).
- [25] P. L. Hanselaer, W. H. Lafière, R. L. Van Meirhaeghe, and F. Cardon, *J. Appl. Phys.*, **56**, 2309 (1984).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.334265>
- [26] C. Detavernier, R. L. Van Meirhaeghe, R. Donaton, K. Maex, and F. Cardon, *J. Appl. Phys.*, **84**, 3226 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.368475>
- [27] R. Sharma, M. Xian, M. E. Law, M. Tadjer, F. Ren, and S. J. Pearton, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38**, 063414 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1116/6.0000693>
- [28] W. S. Tan, M. J. Uren, P. A. Houston, R. T. Green, R. S. Balmer, and T. Martin, *IEEE Electron Device Lett.*, **27**, 1 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2005.860383>
- [29] W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, and I. Adesida, *Solid-State Electron.*, **46**, 1441 (2002).
doi: [https://doi.org/10.1016/s0038-1101\(02\)00089-8](https://doi.org/10.1016/s0038-1101(02)00089-8)
- [30] J. H. Ji and J. H. Koh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 3 (2017).
<https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3517150>