

## 고유전율 필드 플레이트를 적용한 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 쇼트키 장벽 다이오드

박세림, 이태희, 김희철, 김민영, 문수영, 이희재, 변동욱, 이건희, 구상모 

광운대학교 전자재료공학과

### Vertical $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Barrier Diodes with High- $\kappa$ Dielectric Field Plate

Se-Rim Park, Tae-Hee Lee, Hui-Cheol Kim, Min-Yeong Kim, Soo-Young Moon, Hee-Jae Lee,  
Dong-Wook Byun, Geon-Hee Lee, and Sang-Mo Koo

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

(Received January 6, 2023; Revised February 20, 2023; Accepted February 27, 2023)

**Abstract:** In this paper, we discussed the effect of field plate dielectric materials such as silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>), aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), and hafnium oxide (HfO<sub>2</sub>) on the breakdown characteristics of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes (SBDs). The breakdown voltage (BV) of the SBDs with a field plate was higher than that of SBDs without a field plate. The higher dielectric constant of HfO<sub>2</sub> contributed to the superior reduction in electric field concentration at the Schottky junction edge from 5.4 to 2.4 MV/cm. The SBDs with HfO<sub>2</sub> field plate showed the highest BV of 720 V, and constant specific on-resistance ( $R_{on,sp}$ ) of 5.6 m $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>, resulting in the highest Baliga's figure-of-merit (BFOM) of 92.0 MW/cm<sup>2</sup>. We also investigated the effect of dielectric thickness and field plate length on BV.

**Keywords:**  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Schottky barrier diodes (SBDs), Field plate, High- $\kappa$  dielectric

산화갈륨( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 넓은 에너지 밴드갭(4.8 eV), 높은 항복 전계(8 MV/cm)와 Baliga의 성능 지수(3400)로 인해 차세대 전력 전자 재료로서 주목받고 있다 [1,2]. 또한  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 비음 측면에서 효율적인 용액 성장법을 통해 결함이 적은 대면적 단결정 기판의 성장이 가능하다 [3]. 이러한  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 뛰어난 특성 덕분에, 질화갈륨(GaN)과 탄화규소(SiC)의 이론적 한계를 뛰어넘는 높은 전압과 전계를 가지는 측면 및 수직 구조의 SBD, MOSFET, MESFET을 포함한 다양한 전력 소자들에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다 [5-7]. 그리고 고전력 쇼트키 장벽 다이오드(schottky barrier diode, SBD)는 전류 스케일링

과 효율적인 열 관리의 측면에서 수직 구조가 수평 구조보다 우수하다고 알려져 있다 [3-5]. 하지만 수직 구조의 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBD에서는 전극 가장자리에서의 전계 집중 현상으로 premature breakdown이 일어나 항복전압(breakdown voltage, BV)이 제한된다는 문제가 있다 [7,8]. 이러한 전계 집중 현상을 줄이기 위해 효율적인 edge termination 기술이 필수적이며, edge termination 기술에는 field plate (FP), guard ring (GR), junction termination extension (JTE), floating metal rings, trench MOS 구조와 같이 다양한 종류가 있다 [10,11].

그러나 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 P형 도핑의 어려움으로 인해 Si 및 SiC 소자에 일반적으로 사용되는 이온 주입을 통한 GR과 JTE 같은 기술을 사용할 수 없다 [9,10]. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 이러한 기술적인 한계에도 불구하고, 지금까지 고성능 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기반 SBD는 이온 주입이 필요 없는 간단한 FP 기술을 통해 활발하게 연구되어 왔다 [2,3,9,10]. FP 기술에서 반도체와

✉ Sang-Mo Koo; [smkoo@kw.ac.kr](mailto:smkoo@kw.ac.kr)

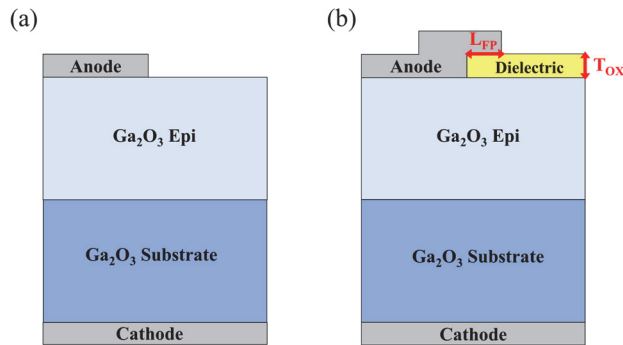
Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

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.

유전체의 우수한 계면 특성은 매우 중요한데, high- $\kappa$  유전체는 반도체와 작은 전도대 오프셋(conduction band offset,  $\Delta E_C$ )을 가져 소자의 누설전류가 발생할 확률을 증가시킨다 [16].  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 넓은 밴드갭은 적용 가능한 유전체의 종류를 제한하며, 이로 인해 SiO<sub>2</sub> 외에 high- $\kappa$  유전체이면서  $\Delta E_C$ 가 충분히 큰 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 HfO<sub>2</sub> 물질에 대한 연구가 주로 이루어졌다 [16,19].

본 연구는 FP 구조를 갖는  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBD의 항복 특성을 Silvaco TCAD simulation을 사용하여 알아보았다. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub> 세 가지의 유전체를 적용한 소자의 전기적 특성과 전계 분포를 비교하였다. 유전체 물질뿐만 아니라 유전체 두께( $T_{OX}$ )와 field plate 길이( $L_{FP}$ )가 BV에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 1(a)는 FP가 없는 SBD [W/O FP]이고, 그림 1(b)는 FP가 적용된 SBD [W/FP]의 구조를 보여준다. 소자 구조의 파라미터는 표 1에 표기하였다. 사용한 유전체의 종류는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>이며, 물질의 유전상수는 각각 3.9, 9.0, 25.0이다 [13]. 이동도 모델은 ANALYTIC, CONMOB, FLDMOB, 캐리어 생성-재결합 모델은 SRH (Shockley-read-hall), auger 재결합, 항복 특성을 확인하기 위한 IMPACT SELB 모델이 사용되었다. 유전체 물질에 따른 BV와 전계 분포를 비교한 후,  $T_{OX}$ 를 0.2에서 2.0  $\mu$ m



**Fig. 1.** A schematic cross section of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDs (a) without FP [W/O FP] and (b) with FP [W/FP].

**Table 1.** Structure parameters of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDs.

Parameters	Value
Epi thickness ( $\mu$ m)	10
Epi doping concentration ( $cm^{-3}$ )	$2.8 \times 10^{16}$
Substrate thickness ( $\mu$ m)	10
Substrate doping concentration ( $cm^{-3}$ )	$4.8 \times 10^{18}$
Anode metal work function (eV)	5.1

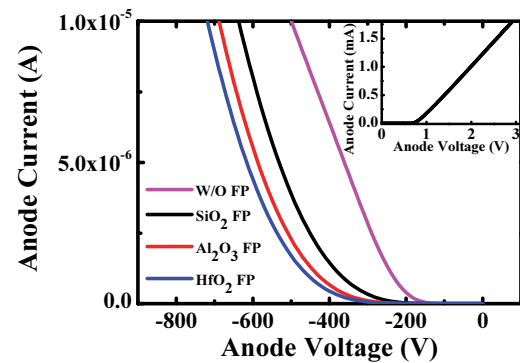
까지,  $L_{FP}$ 를 0에서 20  $\mu$ m까지 변화시키며 BV에 미치는 영향을 확인하였다. 시뮬레이션을 위해 사용한 물질의 파라미터들은 표 2에 나타냈다 [13-18].

그림 2는 W/O, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub> FP 소자의 forward와 reverse I-V 특성을 나타낸다. BV는 reverse 전류가  $1.0 \times 10^{-5}$  A일 때의 전압으로 비교하였으며, 각각 500, 640, 690, 720 V이다. 이때 W/FP (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>) 소자의  $T_{OX}$ 와  $L_{FP}$ 는 각각 0.36과 5  $\mu$ m로 동일하다. 유전체의 유전상수가 증가할수록 BV가 증가하며, BV는 HfO<sub>2</sub> FP에서 W/O FP 소자 대비 약 44% 증가하였다. 이러한 경향은 FP로 인한 Schottky junction edge 근처의 전계 감소와 연관이 있을 수 있다 [8]. 온저항(specific on-resistance,  $R_{on,sp}$ )은 anode current= $2.0 \times 10^{-5}$  A에서 5.6  $m\Omega \cdot cm^2$ 로 모든 소자에서 동일하며, forward 특성에서는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

그림 3(a)는 anode voltage ( $V_{anode}$ )=-500 V일 때의 전계 분포를 보여준다. 그림 3(b)는 x축 방향의 A-A' 선(x: 10~25  $\mu$ m, y: 0.01  $\mu$ m)을 따라 확인한 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 에피층 내의 전계 분포를 보여준다. W/O FP 소자의 전계는 Schottky

**Table 2.** Reported parameters of different materials deposited on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Parameters	$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HfO <sub>2</sub>
Bandgap (eV)	4.8	8.7	6.9	5.4
Dielectric constant	10.0	3.9	9.0	25.0
Critical Breakdown Field (MV/cm)	8.0	10.0	8.7	5.3
$\Delta E_C$ (eV)	-	2.87	2.23	1.30
$\Delta E_V$ (eV)	-	1.23	0.07	-0.50
Alignment type		Straddling	Straddling	Staggered



**Fig. 2.** Forward (inset) and reverse I-V characteristics of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDs.

junction edge 영역인 15  $\mu\text{m}$  근처에만 집중되어 있지만, W/FP ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$  FP) 소자의 전계는 한 곳에 집중되지 않고 FP가 있는 영역까지 분포되어 있다. W/O FP 소자는 Schottky junction edge에서 5.4 MV/cm의 최대 전계를 보인다. 같은 영역에서  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$  FP 소자는 각각 3.2, 2.7, 2.4 MV/cm의 전계를 가진다. 유전상수가 가장 큰  $\text{HfO}_2$ 를 사용한 소자에서 가장 낮은 전계를

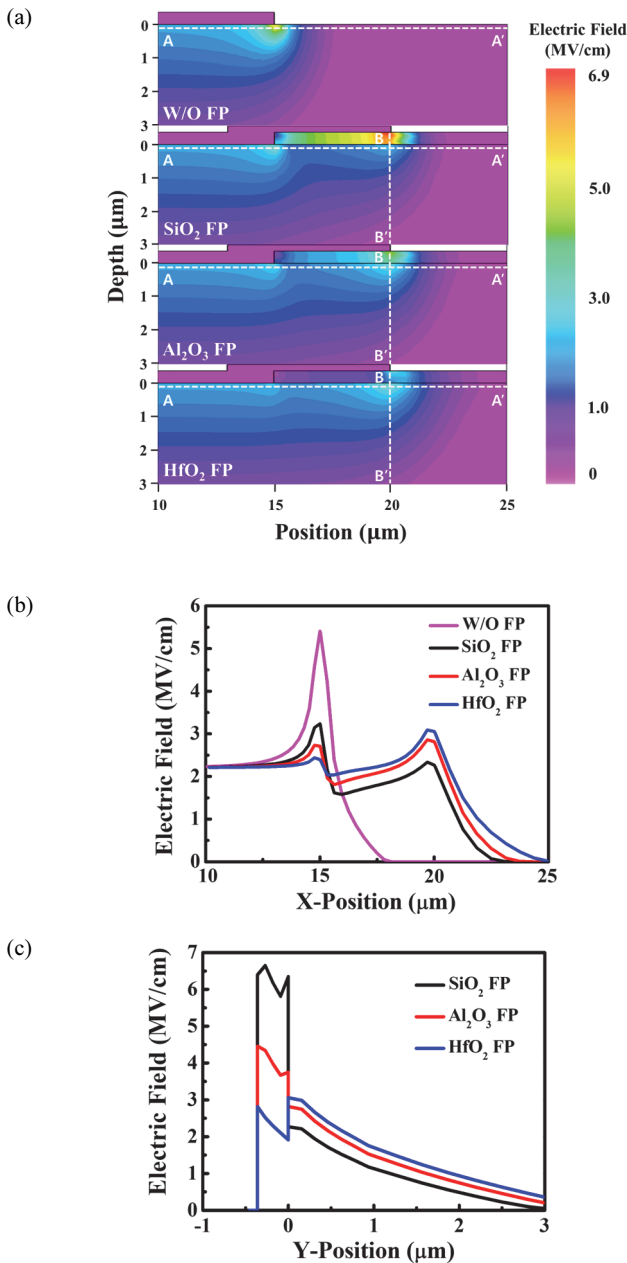


Fig. 3. (a) Electric field distribution for the anode voltage of  $V_{\text{anode}} = -500$  V, (b) electric field values along the A-A' line, and (c) electric field values along the B-B' line.

보이며, 이는 유전상수가 큰 유전체를 사용할수록 Schottky junction edge의 전계 집중 현상을 더 많이 줄일 수 있다는 것과 관련이 있다 [20]. 그림 3(c)는 W/FP 소자에서 y축 방향의 B-B' 선( $x: 20 \mu\text{m}$ ,  $y: -0.36 \sim 3 \mu\text{m}$ )을 따라 확인한 전계 분포를 보여준다. 유전체에 걸리는 최대 전계는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$  FP 소자에서 각각 6.6, 4.5, 2.8 MV/cm이다.  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  FP 소자는 유전체에 최대 전계가 걸리는 반면,  $\text{HfO}_2$  FP 소자는  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  에피층에서 최대 전계를 보인다. 이러한 경향은 가우스 법칙( $E_{\text{low } \kappa} / E_{\text{high } \kappa} = \kappa_{\text{high } \kappa} / \kappa_{\text{low } \kappa}$ )에 의해 추론될 수 있으며 [14,21],  $\text{HfO}_2$  ( $\sim 25$ )의 유전상수가  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ( $\sim 10$ )보다 높은 것과 연관이 있다. 그림 4는  $V_{\text{anode}} = -500$  V와  $-1,000$  V일 때 Schottky junction edge와 유전체에 각각 걸리는 최대 전계 값을 나타낸다.  $V_{\text{anode}} = -500$  V일 때, 그림 3(c)를 통해 확인한 유전체에 걸리는 최대 전계는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ 의 항복 전계인 10, 8.7, 5.3 MV/cm에 도달하지 않는다.  $V_{\text{anode}} = -1,000$  V일 때, 유전체에 걸리는 최대 전계는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$  FP 소자에서 각각 11.4, 7.6, 4.8 MV/cm이다. 이때  $\text{SiO}_2$  FP 소자는  $\text{SiO}_2$ 의 항복 전계를 초과하지만,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,

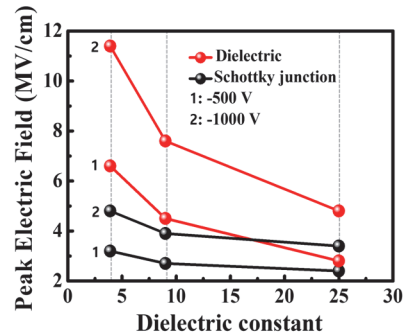


Fig. 4. Peak electric field in dielectric and Schottky junction edge with dielectric constant for 3.9, 9.0, and 25.0 (curves 1, 2 correspond to the  $V_{\text{anode}} = -500$  and  $-1,000$  V, respectively).

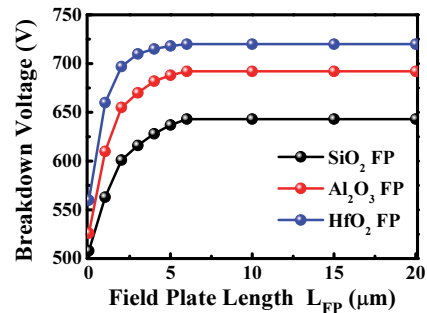


Fig. 5. Breakdown voltage as a function of field plate length ( $L_{\text{FP}}$ ) for the three dielectric materials ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{HfO}_2$ ).

HfO<sub>2</sub> FP 소자는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 HfO<sub>2</sub>의 항복 전계에 도달하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 5는 L<sub>FP</sub>를 0에서 20 μm까지 변화시켰을 때의 BV를 보여준다. BV는 모든 소자에서 L<sub>FP</sub>가 증가함에 따라 같이 증가하다가, L<sub>FP</sub>가 6 μm에 도달하였을 때 더 이상 증가하지 않는다. L<sub>FP</sub>=6 μm 이상부터는 L<sub>FP</sub>의 변화가 BV의 증가에 영향을 끼치지 않으며, BV가 포화되기 시작하는 6 μm를 최적의 L<sub>FP</sub>라고 할 수 있다. 이러한 경향은 L<sub>FP</sub>가 비공핍 영역까지 확장되어 전계가 크게 감소하거나 BV가 증가하지 않는 것으로 판단된다 [13,21].

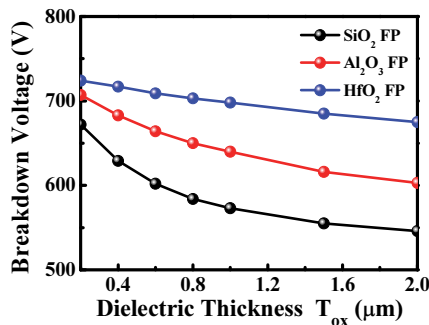


Fig. 6. Breakdown voltage as a function of dielectric thickness (Tox) for the three dielectric materials (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and HfO<sub>2</sub>).

그림 6은 T<sub>OX</sub>를 0.2에서 2.0 μm까지 변화시켰을 때의 BV를 보여준다. 모든 소자에서 BV는 T<sub>OX</sub>가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 T<sub>OX</sub>가 증가함에 따라 FP가 Schottky junction edge 영역의 전계 완화 효과에 미치는 영향력이 감소하는 것과 관련이 있다 [12,21]. T<sub>OX</sub>가 0.2 μm일 때, SiO<sub>2</sub> FP 소자의 BV는 약 670 V이다. 이후 BV는 T<sub>OX</sub>가 증가함에 따라 감소하여 T<sub>OX</sub>=2.0 μm에서 550 V로 약 120 V가 감소한다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FP 소자는 같은 범위에서 BV가 약 110 V 감소하고, HfO<sub>2</sub> FP 소자는 약 40 V 감소한다. 이를 통해 유전상수가 큰 유전체를 사용할수록 T<sub>OX</sub>에 따른 BV의 감소량이 작음을 알 수 있다.

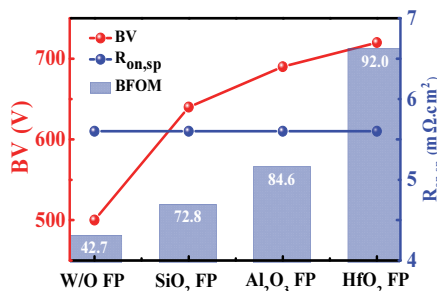


Fig. 7. R<sub>on,sp</sub>, BV, and BFOM for the different four devices.

그림 7은 각 소자의 R<sub>on,sp</sub>, BV, Baliga's figure-of-merit (BFOM) 관계를 보여준다. BFOM [22]은 고전력 장치 응용분야를 위한 반도체 재료의 적합성을 나타내는 매개변수로서 각 소자의 성능을 비교하기 위해 사용된다. R<sub>on,sp</sub>과 BV는 그림 2로부터 추출되었으며, BFOM (BV<sup>2</sup>/R<sub>on,sp</sub>)은 W/O, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub> FP 소자에서 각각 42.7, 72.8, 84.6, 92.0 MW/cm<sup>2</sup>이다. HfO<sub>2</sub> FP 소자는 W/O FP 소자와 비교하여 약 44%가 향상된 720 V의 BV 값을 가진다. 또한, R<sub>on,sp</sub>을 5.6 mΩ·cm<sup>2</sup>로 유지하므로 W/O FP 소자보다 2배 이상 개선된 92.0 MW/cm<sup>2</sup>의 높은 BFOM 값을 보이며, SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FP 소자에 비해 뛰어난 전기적 특성을 보여준다.

본 연구에서는 FP 구조를 적용한 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDs를 설계하여 FP의 유전체 물질, T<sub>OX</sub>, L<sub>FP</sub>의 변화에 따른 항복 특성을 분석하였다. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>를 각각 FP의 유전체 물질로 사용하였으며, 이 중 HfO<sub>2</sub>를 적용한 소자에서 Schottky junction edge의 전계가 5.4 MV/cm에서 2.4 MV/cm까지 가장 크게 감소하였다. 이러한 전계 집중 현상의 완화는 FP가 없는 SBDs 대비 BV를 약 44%까지 향상시킬 수 있었다. 이후 각 유전체를 적용한 FP 구조에서 T<sub>OX</sub>와 L<sub>FP</sub> 변화가 BV에 미치는 영향을 확인하였다. BV가 더 이상 증가하지 않고 포화되는 최적의 L<sub>FP</sub>가 존재하며, HfO<sub>2</sub>를 적용한 소자에서 T<sub>OX</sub>의 변화에 따른 BV의 감소량이 가장 작음을 확인했다. 결과적으로, HfO<sub>2</sub> FP 소자에서 R<sub>on,sp</sub> (~5.6 mΩ·cm<sup>2</sup>), BV (~720 V), BFOM (~92.0 MW/cm<sup>2</sup>)의 우수한 전기적 특성을 보였다. High-κ FP를 도입한 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDs는 P-type 도핑이 어려운 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소자에서 이온 주입 없이도 간단하고 효율적인 edge termination을 가능하게 해주며, 전력 변환 시스템의 인버터 모듈과 같은 응용분야로서 큰 잠재력을 보여준다.

ORCID

Sang-Mo Koo

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

감사의 글

This work was supported by Technology Innovation Program (20016102) 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 the present research has been conducted by the Research Grant of Kwangwoon University in 2023.

## REFERENCES

- [1] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary 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>]
- [2] S. Roy, A. Bhattacharyya, P. Ranga, H. Splawn, J. Leach, and S. Krishnamoorthy, *IEEE Electron Device Lett.*, **42**, 1140 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3089945>]
- [3] W. Li, K. Nomoto, Z. Hu, D. Jena, and H. G. Xing, *IEEE Electron Device Lett.*, **41**, 107 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2953559>]
- [4] Y. Zhang, M. Sun, Z. Liu, D. Piedra, H. S. Lee, F. Gao, T. Fujishima, and T. Palacios, *IEEE Trans. Electron Devices*, **60**, 2224 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2261072>]
- [5] M. H. Wong and M. Higashiwaki, *IEEE Trans. Electron Devices*, **67**, 3925 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3016609>]
- [6] C. Joishi, Y. Zhang, Z. Xia, W. Sun, A. R. Arehart, S. Ringel, S. Lodha, and S. Rajan, *IEEE Electron Device Lett.*, **40**, 1241 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2921116>]
- [7] S. Dhara, N. K. Kalarickal, A. Dheenan, C. Joishi, and S. Rajan, *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 203501 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0123284>]
- [8] D. Liu, Y. Huang, Z. Zhang, D. Chen, Q. Feng, H. You, J. Zhang, C. Zhang, and Y. Hao, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **10**, 125001 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac3afd>]
- [9] N. Allen, M. Xiao, X. Yan, K. Sasaki, M. J. Tadjer, J. Ma, R. Zhang, H. Wang, and Y. Zhang, *IEEE Electron Device Lett.*, **40**, 1399 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2931697>]
- [10] H. Chen, H. Wang, and K. Sheng, *IEEE Electron Device Lett.*, **44**, 21 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3222878>]
- [11] Y. Gao, A. Li, Q. Feng, Z. Hu, Z. Feng, K. Zhang, X. Lu, C. Zhang, H. Zhou, W. Mu, Z. Jia, J. Zhang, and Y. Hao, *Nanoscale Res. Lett.*, **14**, 8 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2849-y>]
- [12] A. S. Kumta, Rusli, and J. Xia, *IEEE Trans. Electron Devices*, **56**, 2925 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2009.2033155>]
- [13] R. Sharma, E. E. Patrick, M. E. Law, F. Ren, and S. J. Pearton, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q234 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0141912jss>]
- [14] P. H. Carey, J. Yang, F. Ren, R. Sharma, M. Law, and S. J. Pearton, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q3221 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0391907jss>]
- [15] A. J. Green, J. Speck, G. Xing, P. Moens, F. Allerstam, K. Gumaelius, T. Neyer, A. Arias-Purdue, V. Mehrotra, A. Kuramata, K. Sasaki, S. Watanabe, K. Koshi, J. Blevins, O. Bierwagen, S. Krishnamoorthy, K. Leedy, A. R. Arehart, A. T. Neal, S. Mou, S. A. Ringel, A. Kumar, A. Sharma, K. Ghosh, U. Singiseti, W. Li, K. Chabak, K. Liddy, A. Islam, S. Rajan, S. Graham, S. Choi, Z. Cheng, and M. Higashiwaki, *APL Mater.*, **10**, 029201 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0060327>]
- [16] P. H. Carey IV, F. Ren, D. C. Hays, B. P. Gila, S. J. Pearton, S. Jang, and A. Kuramata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 071101 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.071101>]
- [17] P. H. Carey IV, F. Ren, D. C. Hays, B. P. Gila, S. J. Pearton, S. Jang, and A. Kuramata, *Vacuum*, **142**, 52 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.05.006>]
- [18] V. D. Wheeler, D. I. Shahin, M. J. Tadjer, and C. R. Eddy, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **6**, Q3052 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0131702jss>]
- [19] Y. Jia, K. Zeng, J. S. Wallace, J. A. Gardella, and U. Singiseti, *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 102107 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4915262>]
- [20] S. N. Mohammad, F. J. Kub, and C. R. Eddy Jr., *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **29**, 021021 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1116/1.3562276>]
- [21] M. C. Tarplee, V. P. Madangarli, Q. Zhang, and T. S. Sudarshan, *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**, 2659 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1109/16.974686>]
- [22] M. Higashiwaki, *AAPPS Bull.*, **32**, 3 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00033-0>]