


질소 이온 도핑을 이용한 산화갈륨 JFET의 전기적 특성 분석

김형우 , 김종헌, 서재화

한국전기연구원 차세대반도체연구센터

Analysis of the Electrical Characteristics of the β -Ga₂O₃ JFET by Using Nitrogen Doping

Hyoung Woo Kim, Jung Hun Kim, and Jae Hwa Seo

Advanced Semiconductor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 51543, Korea

(Received November 15, 2024; Revised November 23, 2024; Accepted November 27, 2024)

Abstract: In this study, we proposed β -Ga₂O₃ JFET using nitrogen doping and analyzed the electrical characteristics. In β -Ga₂O₃, nitrogen ions act as a deep acceptor and are used to implement the current blocking layer. By using this characteristic of the nitrogen ion, in the proposed JFET, nitrogen ions are used to obtain gate control and pinch off the channel of the JFET. The numerical TCAD simulation was performed to design and analyze the proposed JFET. The simulated forward and reverse characteristics of the proposed JFET were obtained as a function of JFET width and nitrogen doping concentration. The maximum breakdown voltage of 1.7 kV was obtained with the on-resistance of 16.7 m Ω ·cm² when the channel width was 1.5 μ m and nitrogen doping concentration is 1 \times 10¹⁸/cm³, respectively.

Keywords: Ga₂O₃, Nitrogen doping, JFET, Oxide semiconductor, Power semiconductor

1. 서론

전력 반도체 소자는 가전, 사무, 전기차, 신재생에너지, 우주·항공 등 다양한 산업 분야에 적용되는 소자로서, 효율적인 전력 제어를 위해 높은 항복 전압, 낮은 온-저항을 필요로 한다 [1]. 최근까지는 wide bandgap (WBG)을 가지는 SiC (silicon carbide)나 GaN (gallium nitride) 소재 기반의 전력 반도체 소자가 주목받고 있다. 특히 SiC의 경우 기존에 전력 반도체 소자에 사용되던 실리콘 대비 높은 임계 전계(3 MV/cm)와 열전도성(3.4 W/cm·K), 넓은 밴드갭(3.26 eV) 특성을 가지고 있기 때문에 작은 면적으로도 높은 항복 전압과 낮은 온-저항을 얻을 수 있다는 장점이 있다 [2,3]. 하지만 SiC 기반 전력 반도체 소자는 태

양광, 풍력과 같은 신재생 에너지 시스템과 전기 자동차와 같은 분야에 적용됨으로써 급격한 성장을 이뤘음에도 SiC 반도체 내에 존재하는 다수의 결함으로 인한 전기적 특성 및 신뢰성 저하 문제에 대한 연구가 필요하다 [4,5]. 따라서 최근 β -Ga₂O₃ (beta gallium oxide)와 같이 SiC를 대체할 수 있는 차세대 전력 반도체 소자용 소재에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다 [6-9].

β -Ga₂O₃은 SiC나 GaN에 비해 넓은 밴드갭(4.8 eV)과 높은 임계전계(8 MV/cm)를 가지고 있어 차세대 전력 반도체 소자용 소재로 각광받고 있으며 [10,11], 현재에도 β -Ga₂O₃은 다양한 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) 제작에 사용되고 있다 [6,7,12]. 그럼에도 MOSFET의 성능은 품질이 좋지 않은 산화물 유전체 표면에 의해 전하의 이동이 억제됨에 따라 심각하게 영향을 받고 있다 [13]. 이와는 달리 JFET (junction field effect transistor)는 게이트 금속과 반도체층 사이에 유전체막이 없기 때문에 낮은 유전체 표면에 따른 소자

✉ Hyoung Woo Kim; hwkim@keri.re.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.

의 성능 저하가 일어나지 않는다. 하지만 n-type 특성을 가지는 β -Ga₂O₃에서의 p-type 도핑의 어려움으로 인해 β -Ga₂O₃를 이용한 JFET 소자에 대한 연구는 그동안 거의 이루어지지 않았다 [14].

최근에 마그네슘(Mg)이나 질소(N)를 주입함으로써 β -Ga₂O₃에서 acceptor 도핑을 할 수 있음을 입증한 연구 결과나 질소 이온 주입을 이용한 β -Ga₂O₃ 소자에 대한 다수의 연구 결과가 발표된 바 있다 [15-17]. 일반적으로 마그네슘이나 질소의 경우 β -Ga₂O₃ 내에서 deep acceptor로 작용하며, 마그네슘에 비해 질소의 열 확산 계수(thermal diffusivity)가 낮기 때문에 질소를 높은 온도에서 활성화(activation)해도 불순물 분포(impurity profile)의 큰 변화 없이 높은 활성화도(activation efficiency)를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다 [15].

본 논문에서는 β -Ga₂O₃ 내에서 deep acceptor로 작용하는 질소의 특성을 바탕으로 질소 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET 소자를 제안하고, 질소가 도핑된 영역 간 거리(JFET channel)와 질소의 도핑 농도 변화에 따른 소자의 전기적 특성에 대해 시뮬레이션을 바탕으로 분석하였다. 본 논문에서 제안된 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 전기적 특성은 2차원 시뮬레이터인 Silvaco사의 VictoryProcess와 VictoryDevice를 이용해 검증하였다 [18].

2. 시뮬레이션 방법 및 제안된 소자 구조

그림 1에 시뮬레이션에 사용된 질소 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 구조도를 나타내었다.

시뮬레이션에 사용된 소자는 JFET 구조 형성을 위해 *trenched gate* 구조를 적용하였으며, JFET에서 채널 영역을 구현하기 위한 p-type 영역에는 β -Ga₂O₃ 내에서 deep acceptor로 작용하는 질소를 사용하였다. 제안된 소자의 경우 *trenched gate* 구조를 사용하기 때문에 질소 이온을 깊이 주입하지 않아도 JFET 영역의 구현이 가능하며, 따라서 질소 이온 주입 에너지를 최소화할 수 있어 이온 주입에 따른 β -Ga₂O₃에서의 damage를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 소자의 구조와 질소 이온이 소자의 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 질소 이온이 주입된 영역의 간격(W_{ch})과 질소 이온 도핑 영역의 농도(N_{N-dop})를 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1에 시뮬레이션에 사용된 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 구조 변수를 나타내었다. JFET 구현을 위해 사용된 *trench gate*의 깊이는 1 μ m이며, 질소 이온이 도핑된 영역 사이

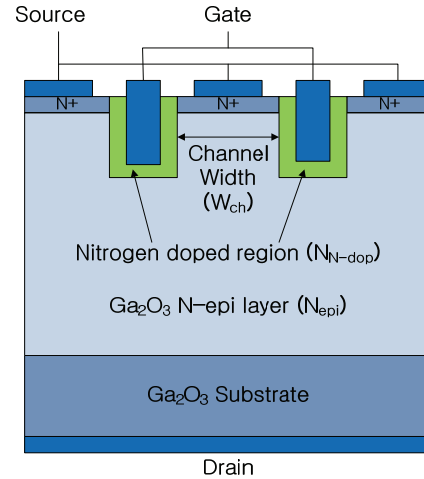


Fig. 1. Cross-sectional view of the β -Ga₂O₃ JFET by using nitrogen doping used in the simulation.

Table 1. Device parameters used in simulation.

Parameter	Value
Cell pitch	4 μ m
β -Ga ₂ O ₃ epi. concentration	$1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$
β -Ga ₂ O ₃ epi. thickness	10 μ m
Trench gate depth	1 μ m
Nitrogen concentration	$1 \times 10^{18} / \text{cm}^3, 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$
Nitrogen implant depth	0.5 μ m
JFET channel width	1.0~3.0, at 0.5 μ m intervals

의 간격은 1~3 μ m 범위에서 0.5 μ m씩 변화시켰으며, 질소 이온이 도핑된 영역은 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 과 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 의 농도와 깊이 0.5 μ m의 box profile을 사용하였다. 질소 이온 도핑 영역의 깊이 구현이 가능한지를 확인하기 위해 SRIM [19] 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 JFET 구현을 위해 필요한 0.5 μ m 깊이의 box profile을 얻기 위해서는 50, 100, 200, 300, 350 keV의 주입 에너지가 필요한 것을 확인할 수 있었다. 그림 2에 질소 이온 주입 에너지 변화에 따른 SRIM 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

시뮬레이션에서는 Chynowethe's law를 수정한 Selberherr's model을 impact ionization model로 사용하였으며, impact ionization 계수는 아래와 같다.

$$\alpha_n = A_N \cdot \exp\left[-\frac{B_N}{E}\right] \quad (1)$$

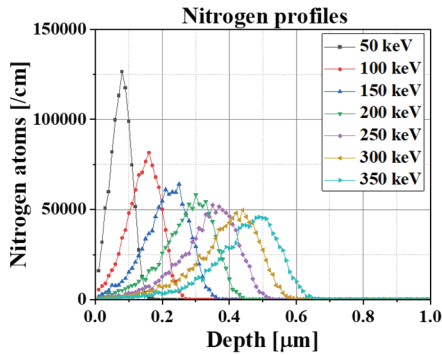


Fig. 2. Nitrogen depth profile simulation results according to ion implantation energy.

이때 A_N 과 B_N 은 각각 $0.79 \times 10^6 / \text{cm}$, $2.92 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 을 사용하였다 [20]. 또한 시뮬레이션에서는 deep acceptor-like trap, Arora mobility model, Canali model, impact ionization model과 같은 물리적 model을 함께 사용하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 3은 질소 이온이 주입된 영역의 농도가 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 이고, JFET 채널 폭이 각각 $1 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$ 일 때, drain 전압 $1,000 \text{ V}$ 에서의 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ JFET 소자 내 공핍층 폭과 전계 분포를 나타낸 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 JFET 채널 폭이 $1 \mu\text{m}$ 인 경우 질소 이온 도핑 영역으로부터의 공핍층으로 인해 전류 경로가 잘 차단된 반면 JFET 채널 폭이 $2 \mu\text{m}$ 일 때는 공핍층 폭이 충분하지 못해 전류 이동 경로가 완전히 차단되지 않는다. 전계 분포의 경우에도 두 가지 경우 모두 최대 전계는 질소 이온이 도핑된 영역의 끝단에서 나타나는 것은 동일하지만 JFET 채널 폭이 $1 \mu\text{m}$ 인 경우 최대 전계 값이 2.9 MV/cm 인 데 비해 JFET 채널 폭이 $2 \mu\text{m}$ 인 경우에는 3.5 MV/cm 로 더 높은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 질소 이온의 경우 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 에 주입되어 deep acceptor로 작용하며, JFET의 채널 영역에 공핍층을 유발해 전류 경로를 막는 역할을 하기는 하지만 [15], $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 에서의 질소 이온에 의한 공핍층 폭이 작기 때문인 것으로 판단된다 [21].

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 에서의 공핍층 폭이 작기 때문에 JFET 채널 폭이 큰 경우 전류 이동 경로가 완전히 차단되지 않으며, 또한 좁은 공핍층으로 인해 질소 이온이 도핑된 영역의 끝단에서 더 높은 전계가 나타나게 되어 낮은 항복 전압을 나타내게 된다.

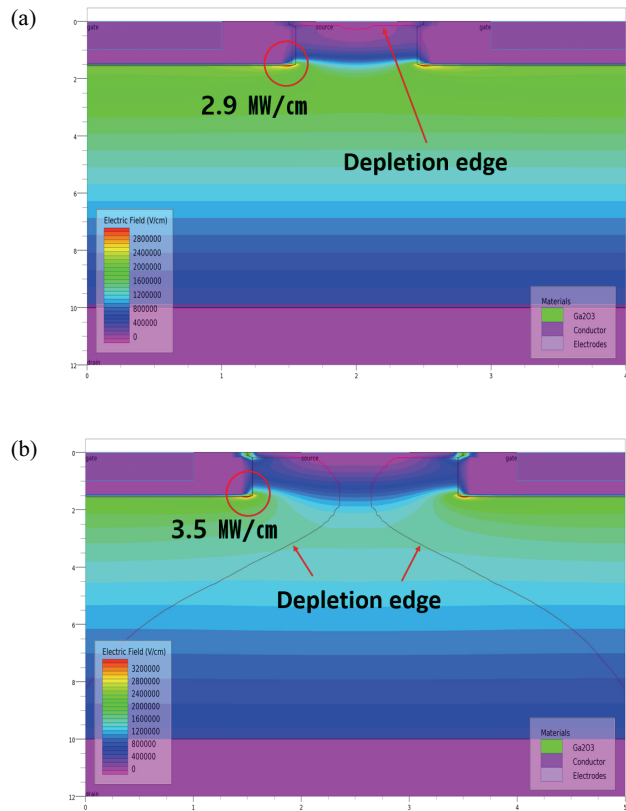


Fig. 3. Depletion width and electric field distribution according to JFET channel width when the $V_{\text{Drain}}=1,000 \text{ V}$: (a) JFET channel width, $W_{\text{ch}}=1 \mu\text{m}$ and (b) JFET channel width, $W_{\text{ch}}=2 \mu\text{m}$.

그림 4에 질소 이온이 도핑된 영역의 농도와 JFET 채널 폭 변화에 따른 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ JFET 소자의 항복 전압 특성을 나타내었다. 최대 항복 전압은 질소 이온이 주입된 영역의 농도와 상관없이 $1,710 \text{ V}$ 를 나타내었으며, JFET 채널 폭이 $1.5 \mu\text{m}$ 보다 커지게 되면 급격하게 항복 전압이 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 질소 이온이 도핑된 영역의 농도가 큰 경우 항복 전압이 40 V 내외로 증가하기는 하지만 소자의 항복 전압에 큰 영향을 주지는 않고 있음을 알 수 있다. 이는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 내에서 deep acceptor로 작용하는 질소 이온의 활성화 에너지가 높기 때문인 것으로 판단된다 [22]. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 내 질소 이온의 활성화 에너지가 높게 되면 주입된 질소 이온이 모두 활성화되지 못하기 때문에 질소 이온 도핑 영역으로부터 확산되는 공핍층의 폭이 작아지게 된다. 따라서 주입된 질소 이온의 양이 증가하더라도 공핍층 확산에 기여하는 질소 이온의 양은 크게 증가하지 않기 때문에 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ JFET 소자의 항복 전압 특성은 질소 이온이 도핑된 영역의 농도보다는 JFET 채널 폭에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

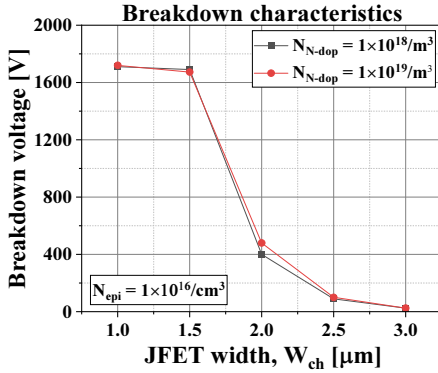


Fig. 4. β -Ga₂O₃ JFET breakdown voltage simulation results according to nitrogen doping concentration and channel width.

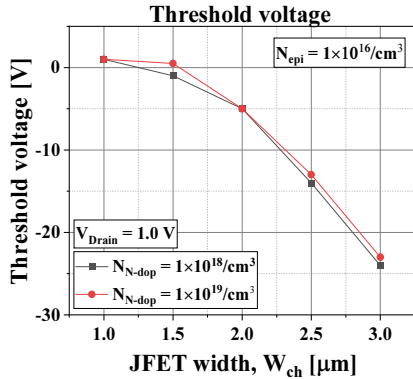


Fig. 5. β -Ga₂O₃ JFET threshold voltage simulation results according to nitrogen doping concentration and channel width.

질소 이온이 도핑된 영역의 농도와 JFET 채널 폭의 변화에 따른 문턱 전압 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 문턱 전압은 drain 전압이 1 V일 때 JFET 채널 영역의 폭에 따라 -25 V에서 1 V까지 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

질소 이온이 도핑된 영역의 농도에 따른 문턱 전압의 차이는 JFET 채널 폭의 변화에 따라 약 1 V 이내로 작게 나타난 반면, JFET 채널 폭의 변화가 문턱 전압에 주는 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 항복 전압 시뮬레이션 결과에서와 마찬가지로 β -Ga₂O₃ 내에서의 질소 이온의 높은 활성화 에너지가 영향을 준 것으로 판단된다.

그림에서 볼 수 있듯이 JFET 채널 폭이 1.5 μm 를 넘어서는 경우 문턱 전압이 -5 V 이하로 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 JFET 채널 폭이 큰 경우 질소 이온이 주입된 영역으로부터의 공핍층이 충분하지 못해 전류 이동 경로가 완전히 pinch-off 되지 못하기 때문이며, 따

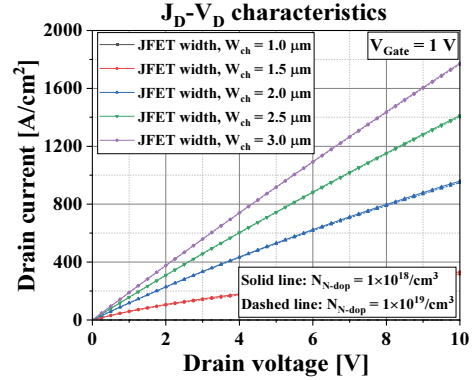


Fig. 6. $J_{\text{Drain}} - V_{\text{Drain}}$ simulation results according to nitrogen doping concentration and channel width.

라서 JFET 채널 폭이 큰 경우 소자를 완전히 off 하기가 힘들다는 것을 의미한다. 이와는 달리 JFET 채널 폭이 1.5 μm 이내인 경우에는 문턱 전압이 질소 이온이 도핑된 영역의 농도에 따라 -1 V에서 1 V까지 낮게 나타난다. 따라서 본 논문에서 제안한 질소 이온 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET 소자는 JFET 채널 폭을 1.5 μm 이내로 사용할 경우 normally-off가 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히 질소 이온이 도핑된 영역의 농도가 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 인 경우 JFET 채널 폭이 1.5 μm 인 경우에도 문턱 전압이 0.5 V로 나타나 gate 전압이 0 V일 때 완전히 off 상태가 되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 제안된 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 $J_{\text{Drain}} - V_{\text{Drain}}$ 특성 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. Gate 전압이 1 V이고 drain 전압을 0~10 V까지 변화시켰을 때, 질소 이온 도핑 영역의 농도와 JFET 채널 폭 변화에 따른 $J_{\text{Drain}} - V_{\text{Drain}}$ 특성 시뮬레이션 결과 온-저항은 JFET 채널 영역의 폭이 1.5 μm 이고, 질소 이온이 주입된 영역의 농도가 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 인 경우에는 $16.7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 질소 이온 도핑 영역의 농도가 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 인 경우에는 $17.2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 나타났다.

시뮬레이션을 통해 얻어진 온-저항을 바탕으로 질소 이온 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 FoM (figure of merit)을 계산한 결과 질소 이온 도핑 영역의 농도가 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 인 경우 $175.1 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 질소 이온 도핑 영역의 농도가 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 인 경우에는 $170 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 를 얻을 수 있었다. 만약 JFET 채널 폭을 증가시키고, 질소 이온 도핑 영역의 농도를 낮출 경우 온-저항은 더 낮아질 수 있겠지만, 이 경우 문턱 전압이 낮아지기 때문에 gate 전압을 이용한 전류 제어가 어려워진다. 따라서 질소 이온 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET 소자의 설계 시에는 normally-off가 가능하면서도 낮은 온-저항과 높은 항복 전압을 얻을

수 있도록 질소 이온 도핑 영역의 농도와 JFET 채널 폭을 선택하여야 한다.

4. 결론

시뮬레이션을 통해 질소 이온 도핑을 이용한 β -Ga₂O₃ JFET을 설계하고 전기적 특성을 분석하였다. 질소 이온 도핑 영역의 농도를 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 및 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 으로 고정하고 JFET 채널 폭을 1.0~3.0 μm 까지 0.5 μm 씩 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행한 결과 JFET 채널 폭이 1.5 μm 이내인 경우 1,710 V로 가장 높은 항복 전압을 얻을 수 있었다. 제안된 소자의 순방향 특성 시뮬레이션 결과 온-저항과 FoM은 질소 이온 도핑 영역의 농도가 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 인 경우 $16.7 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$, $175.1 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 질소 이온 도핑 영역의 농도가 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 인 경우 $17.2 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$, $170 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 를 얻을 수 있었다. 또한 시뮬레이션 결과 제안된 소자의 경우 질소 이온 도핑 영역의 농도를 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 으로 고정하고 JFET 채널 폭을 1.5 μm 이내로 사용할 경우 normally-off가 가능함을 확인할 수 있었다.

ORCID

Hyoung Woo Kim

<https://orcid.org/0000-0003-1047-5803>

감사의 글

본 연구는 방위사업청(DAPA)의 지원을 받는 국방기술진흥연구소의 연구비(KRIT-CT-22-046) 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] B. Baliga, *Introduction. In: Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (Springer, Boston, MA, 2008).
doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-47314-7_1
- [2] J. Kim, H. Yoon, Y. Park, S. Kim, G. Kang, D. Baek, S. Park, and O. Seok, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **73**, 1339 (2024).
doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2024.73.8.1339>
- [3] H. Yoon, C. Kim, Y. Park, G. Kim, G. Kang, and O. Seok, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **71**, 871 (2022).
doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.6.871>
- [4] G. H. Lee, S. Y. Moon, H. J. Lee, M. C. Shin, Y. J. Kim, G. Y. Jeon, J. M. Oh, W. H. Shin, M. K. Kim, C. H. Park, and S. M. Koo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 413 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.4.14>
- [5] J. Wang and X. Jiang, *IET Power Electron.*, **13**, 445 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0587>
- [6] K. Zeng, A. Vaidya, and U. Singiseti, *IEEE Electron Device Lett.*, **39**, 1385 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2859049>
- [7] 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>
- [8] J. Bae, H. W. Kim, I. H. Kang, and J. Kim, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 2687 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/C9TC05161A>
- [9] S. R. Park, T. H. Lee, H. C. Kim, M. Y. Kim, S. Y. Moon, H. J. Lee, D. W. Byun, G. H. Lee, and S. M. Koo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 298 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.14>
- [10] M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitsu, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 034001 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/3/034001>
- [11] 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>
- [12] H. Dong, H. Xue, Q. He, Y. Qin, G. Jian, S. Long, and M. Liu, *J. Semicond.*, **40**, 011802 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1088/1674-4926/40/1/011802>
- [13] J. Kim, M. A. Mastro, M. J. Tadjer, and J. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 29724 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b07030>
- [14] K. Zeng, R. Soman, Z. Bian, S. Jeong, and S. Chowdhury, *IEEE Electron Device Lett.*, **43**, 1527 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3196035>
- [15] M. H. Wong, C. H. Lin, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 102103 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5050040>
- [16] D. Wakimoto, C. H. Lin, Q. T. Thieu, H. Miyamoto, K. Sasaki, and A. Kuramata, *Appl. Phys. Express*, **16**, 036503 (2023).
doi: <https://doi.org/10.35848/1882-0786/acc30e>
- [17] I. K. Kim, S. Cha, and S. M. Hong, *IEEE Trans. Electron Devices*, **69**, 6948 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3217717>
- [18] Silvaco TCAD, Silvaco International, Co. USA.
- [19] J. F. Ziegler and J. P. Biersack, *The Stopping and Range of Ions in Matter*. In: D. A. Bromley (eds) *Treatise on Heavy-Ion Science* (Springer, Boston, MA, 1985).
doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8103-1_3
- [20] K. Ghosh and U. Singiseti, *J. Appl. Phys.*, **124**, 085707 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5034120>

- [21] K. D. Chabak, K. D. Leedy, A. J. Green, S. Mou, A. T. Neal, T. Asel, E. R. Heller, N. S. Hendricks, K. Liddy, A. Crespo, N. C. Miller, M. T. Lindquist, N. A. Moser, R. C. Fitch Jr., D. E. Walker Jr. D. L. Dorsey, and G. H. Jessen, *Semicond. Sci. Technol.*, **35**, 013002 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab55fe>
- [22] H. Ghadi, J. F. McGlone, E. Cornuelle, A. Senckowski, S. Sharma, M. H. Wong, U. Singisetti, Y. K. Frodason, H. Peelaers, J. L. Lyons, J. B. Varley, C. G. Van de Walle, A. Arehart, and S. A. Ringel, *APL Mater.*, **11**, 111110 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0160541>