


1,700 V급 SiC 기반의 단일 및 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET의 최적 설계 및 전기적 특성 분석

유지연, 김동현, 이동현, 강이구 

극동대학교 에너지IT학과

The Optimal Design and Electrical Characteristics of 1,700 V Class Double Trench Gate Power MOSFET Based on SiC

Ji Yeon Ryou, Dong Hyeon Kim, Dong Hyeon Lee, and Ey Goo Kang
Department of Energy IT Engineering, Far East University, Eumseong 27601, Korea

(Received April 5, 2023; Revised April 29, 2023; Accepted May 2, 2023)

Abstract: In this paper, the 1,700 V level SiC-based power MOSFET device widely used in electric vehicles and new energy industries was designed, that is, a single trench gate power MOSFET structure and a double trench gate power MOSFET structure were proposed to analyze electrical characteristics while changing the design and process parameters. As a result of comparing and analyzing the two structures, it can be seen that the double trench gate structure shows quite excellent characteristics according to the concentration of the drift layer, and the breakdown voltage characteristics according to the depth of the drift layer also show excellent characteristics of 200 V or more. Among them, the trench gate power MOSFET device can be applied not only to the 1,700 V class but also to a voltage range above it, and it is believed that it can replace all Si devices currently applied to electric vehicles and new energy industries.

Keywords: Single trench gate, Power MOSFET, Double trench gate, On resistance, Breakdown voltage, Power devices

1. 서론

현재까지 실리콘 기반 전력반도체 소자는 전력반도체의 핵심 소재로 사용되고 있었으나, 실리콘소자의 물성적 한계로 인해 발전 속도가 떨어지고 있는 추세이다. 이러한 실리콘 전력반도체가 가진 한계상황을 대체하기 위해 개발

되고 있는 것이 차세대 전력반도체인 탄화규소 소재 기반 전력반도체이다. SiC 기반의 전력반도체 소자는 실리콘 전력반도체에 비해 3배 정도의 넓은 밴드 갭과 2배 정도의 우수한 열전도성, 10배의 높은 파괴전계강도, 2배의 높은 전자 포화속도를 지니고 있다.

1,700 V급 플래너 게이트 SiC Power MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor)은 JFET (junction field effect transistor)의 영향으로 인해 온저항이 높다는 단점과 소형화 및 경량화에 불리한 면이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 1,700 V급 SiC 기반의 단일(single) 트렌치 게이트 전력 MOSFET과 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET를 제안함과 동시에 실험을 통해 소자 및 공정파라미터를 최적화하고자 하였다.

✉ Ey Goo Kang; keg@kdu.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.

이러한 최적화된 파라미터를 바탕으로 소자를 제작한 후, 패키징까지 진행을 하였다. 패키징 진행 후 전기적인 특성을 분석하여 소자가 정상적으로 동작하고 있음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 소자의 구조 및 동작원리

기존 실리콘 기반의 플래너 게이트 MOSFET에서 발전된 형태는 JFET 형태가 제거된 구조인 트렌치 게이트 전력 MOSFET이다. 본 구조로 발전된 이유는 온 저항에 깊게 영향을 미치는 JFET 영역이 트렌치 영역으로 대체되기 때문에 항복전압은 유지하면서 온 저항을 효율적으로 감소시키기 때문이다. 최근에 가장 많이 활용되는 용량은 600 V급이다. 현재 자동차 및 공장용으로 활용되는 전력반도체 소자는 1,700 V급인데, 이때 주로 활용되는 소자는 실리콘 기반 소자인 전력 IGBT (insulated-gate bipolar transistor) 소자이다. 이 소자를 단순한 SiC 기반의 전력 MOSFET 소자로 대체하기 위해서는 기존 SiC 웨이퍼의 에피층의 깊이보다 2배 이상 필요하다. 따라서 에피 성장 기술이 필수적으로 필요하며, 깊이가 깊을수록 온 저항이 커지므로 온 저항을 줄이기 위해서는 트렌치 게이트를 형성하는 것도 효율적이라 할 수 있다.

그림 1은 1,700 V급 단일 트렌치 게이트 및 이중 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET의 단면도를 나타내고 있다. SiC 전력 MOSFET의 동작은 게이트의 형태와 상관없이 공통된 동작을 하게 되는데, 게이트 단자에 문턱전압 이상을 인가하면 채널이 형성되고, V_{ds} 전압을 인가하게 되면, 그 채널을 통해 전류가 흐르기 시작한다. 이때 흐르는 전류 상에 형성되는 저항이 온 저항이다. 알려진 바와 같이 온 저항은 소자의 에너지 효율을 결정하는 중요한 전기적 특성 중 하나이다.

항복전압은 게이트전압에 0 V를 인가하고, 소오스 전압을 접지상태로 두고 드레인 전압을 상승시켜 측정하는 전기적 특성이다. 1,700 V급 싱글 트렌치 게이트 및 더블 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET 두 소자 모두 항복전압을 유지한 후 온 저항 등의 특성을 향상시키는 방향으로 설계하고 있다.

그림 1에서 보는 것처럼, 1,700 V급 단일 트렌치 게이트 및 이중 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET은 온 저항에 큰 부분을 차지하는 JFET 영역이 사라지기 때문에 일반적인 플래너 게이트 전력 MOSFET보다 온 저항을 크게 줄일 수

있는 장점을 가지고 있으며, 또한 단일 트렌치 게이트 구조보다 더블 트렌치 게이트 구조가 드리프트층 점유율이 높아 온 저항에서 유리한 측면을 가지고 있다고 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 방향으로 설계 및 공정파라미터를 설정하여 실험을 진행하였다.

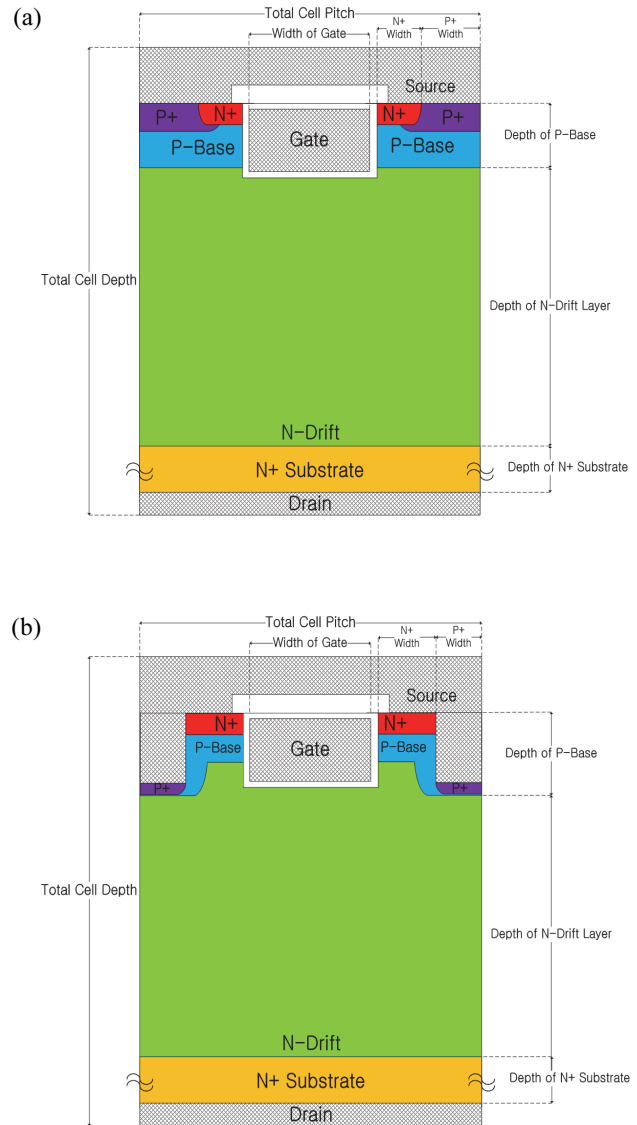


Fig. 1. The structures of power MOSFET based on SiC (a) single trench power MOSFET and (b) double trench power MOSFET.

2.2 실험을 위한 설계 및 공정 파라미터의 설정

실험을 수행하기 위한 1,700 V급 단일 트렌치 게이트 및

Table 1. Process and design parameters of 1,700 V class SiC power MOSFETs.

Process and design parameters	Value
Cell pitch	8 μm
Trench depth of gate	5 μm
Depth of drift layer	20 μm
Doping concentration of substrate	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Doping concentration of Epi layer	$4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Doping concentration of P-base	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Doping concentration of P+ drain region	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Doping concentration of N+ source region	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Gate width	2 μm

이중 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET의 기반 실험을 수행하기 위한 기본적인 공정 및 설계 파라미터를 표 1에 제시하고 있다.

표 1에 있는 공정 및 설계 파라미터를 바탕으로 항복전압과 온 저항에 영향을 끼치는 에피층의 깊이 및 농도를 변화시키면서 항복전압과 온 저항의 전기적인 특성에 관련된 실험을 수행하였다. 또한 문턱전압에 영향을 끼치는 P-base 영역의 농도도 변화시키면서 실험을 수행하였다. 기타 소자의 전기적인 특성에 영향을 끼칠 수 있는 변수에 대한 부분도 고려하여, 실험을 진행하였고 SiC 전력 소자의 문제점으로 지적되고 있는 누설전류 특성을 개선하기 위한 게이트 산화막 두께는 1,000 Å으로 설정하였다. 전기적인 특성을 수행하기 전에 구조를 설정하기 위한 공정시뮬레이션을 통해서 산화막 공정을 최적화하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계 및 공정 파라미터에 따른 1,700 V급 MOSFET 소자의 항복전압 특성

본 절에서는 파라미터를 설정하고 공정 및 설계 시뮬레이션을 통해서 얻은 전기적인 특성에 대해서 고찰하고자 하였다. 우선 그림 2에서는 단일 트렌치 게이트 및 이중 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET의 항복 특성을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 드리프트층의 깊이에 따

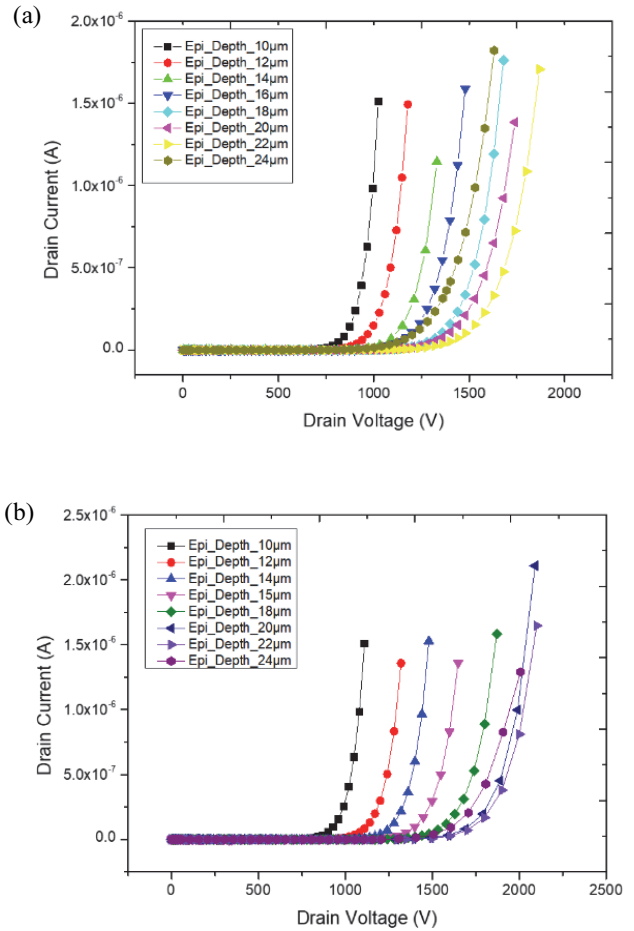


Fig. 2. The breakdown voltage characteristics of 1,700 V class SiC power MOSFETs according to thickness of drift layer (a) single trench gate power MOSFET and (b) double trench gate power MOSFET.

른 항복전압 특성을 보여주고 있는데, 예상한 바와 같이 깊이가 깊어질수록 항복전압은 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 두 소자 모두 드리프트층의 깊이가 22 μm 였을 때 1,700 V 이상의 값을 나타내고 있는데, 실제 공정을 진행할 때는 20 μm 내외에서 설계하면 될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3은 드리프트층의 농도에 따른 단일 트렌치 게이트 및 이중 트렌치 게이트 SiC 전력 MOSFET의 항복전압 특성을 보여주고 있다. Si 소자보다 우수한 것은 같은 항복전압을 유지하더라도 소자의 크기가 1/10로 유지할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그림을 보면 농도가 낮으면 낮을수록 항복전압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 두 소자 모두 1,700 V 이상의 항복전압을 유지하기 위해서는 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이하의 농도를 유지해야 할 것으로 판단된다.

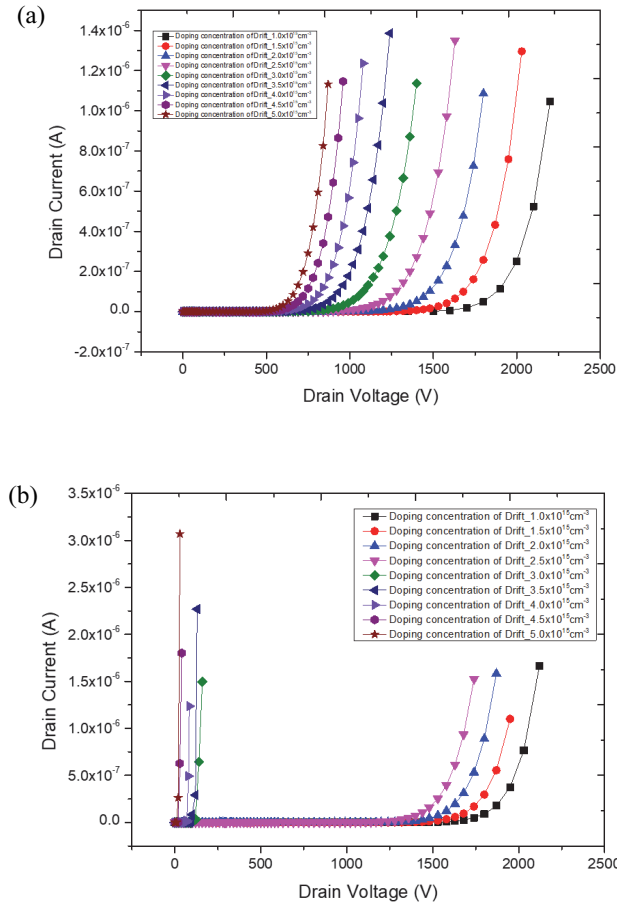


Fig. 3. The breakdown voltage characteristics of 1,700 V class SiC power MOSFETs according to doping concentration of drift layer (a) single trench gate power MOSFET and (b) double trench gate power MOSFET.

3.2 설계 및 공정 파라미터에 따른 1,700 V 급 MOSFET 소자의 온 저항 특성

그림 4에서는 드리프트층의 깊이와 농도에 따른 두 소자의 온 저항 특성을 보여주고 있다. 그림을 보면 알 수 있듯이 드리프트층의 농도와 깊이에 대한 온 저항 특성 또한 트레이드 오프 관계가 있음을 알 수 있다. 서로 교차하는 지점이 최적의 상태라고 볼 수 있다. 단일 트렌치 게이트 전력 MOSFET 소자는 드리프트층의 농도가 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 에서 $80 \text{ m}\Omega$ 의 온 저항을 나타내고 있는데, 항복전압을 유지하기 위해서는 드리프트층의 깊이가 $20 \mu\text{m}$ 이상을 유지한다고 하면 $100 \text{ m}\Omega$ 정도의 온 저항을 갖는다고 볼 수 있다.

한편, 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET 소자도 단일 트렌치게이트와 같은 경향을 보임을 알 수 있다.

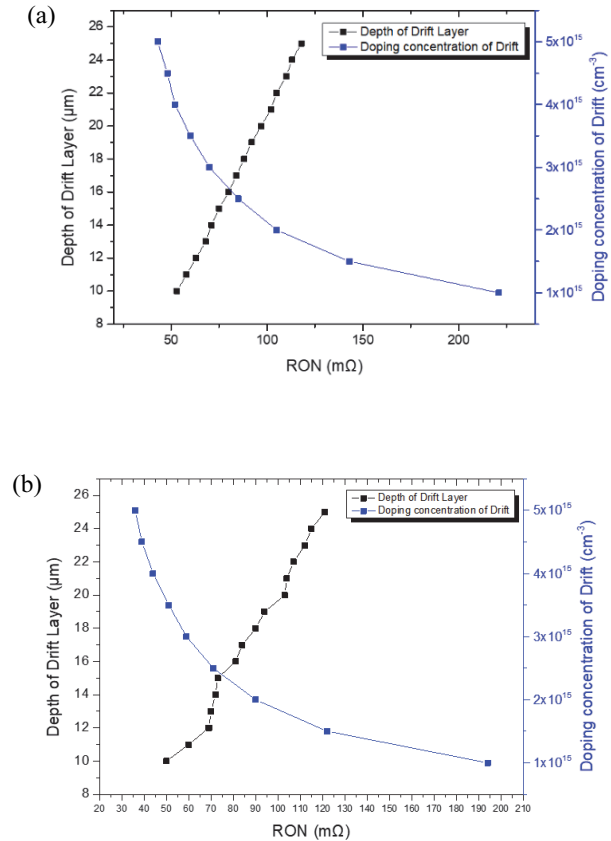


Fig. 4. The breakdown voltage and on resistance characteristics of 1,700 V class SiC power MOSFETs according to thickness and doping concentration of drift layer (a) single trench gate power MOSFET and (b) double trench gate power MOSFET.

3.3 단일 및 이중 트렌치 게이트 SiC MOSFET의 전기적 특성 비교

그림 5와 6은 드리프트층의 농도에 따른 단일 및 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET 소자의 온 저항과 항복전압 특성을 비교한 그림이다. 우선 그림 5를 보면, 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET이 단일 트렌치 게이트 전력 MOSFET보다 우수한 온 저항 특성을 보임을 알 수 있으며, 항복전압도 이전에 서술하였듯이 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 정도에서 항복전압 특성도 우수함을 볼 수 있다. 이는 이중 트렌치 게이트 구조가 드리프트층을 점유하면서 온 저항이 줄어 들고, 소오스 영역을 트렌치 구조로 형성하면서 전계가 트렌치 영역으로 집중하면서 발생하는 현상임을 알 수 있다.

그림 7과 8은 드리프트층의 깊이에 따른 단일 및 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET 소자의 온 저항과 항복전압 특성을 비교한 그림이다. 그림 7의 온 저항 특성은 두 소자

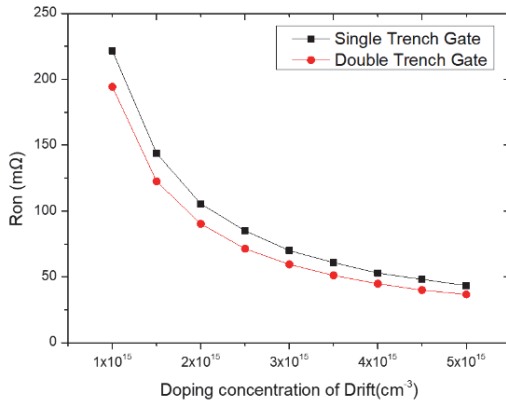


Fig. 5. The comparison to on resistance characteristics of 1,700 V class single and double trench SiC power MOSFETs according to doping concentration of drift layer.

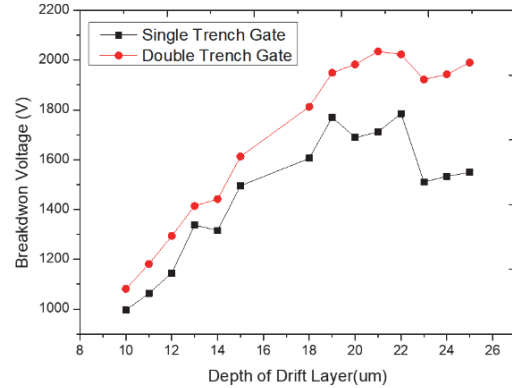


Fig. 8. The comparison to breakdown voltage characteristics of 1,700 V class single and double trench SiC power MOSFETs according to thickness of drift layer.

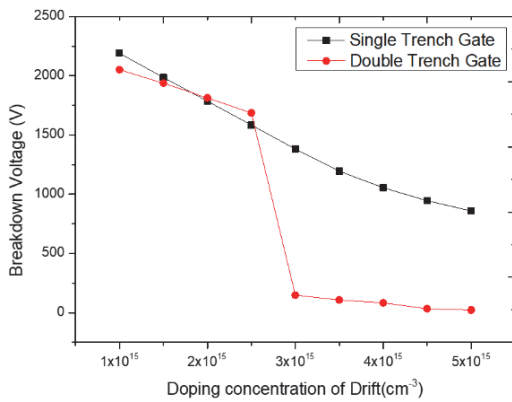


Fig. 6. The comparison to breakdown voltage characteristics of 1,700 V class single and double trench SiC power MOSFETs according to doping concentration of drift layer.

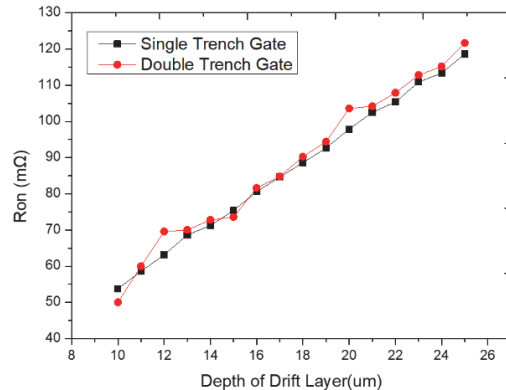


Fig. 7. The comparison to on resistance characteristics of 1,700 V class single and double trench SiC power MOSFETs according to thickness of drift layer.

모두 같은 경향을 보임을 알 수 있지만, 항복전압 특성은 이중 트렌치 게이트 구조가 200 V 이상 우수한 특성을 보여줌을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 및 에너지 신산업 분야에 널리 활용되고 있는 1,700 V급 SiC 기반의 전력 MOSFET 소자를 설계하였는데, 즉 단일 트렌치 게이트 전력 MOSFET 구조와 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET 구조를 제안하여 설계 및 공정 파라미터를 변화시키면서 전기적인 특성을 분석하였다. 두 구조를 비교 분석한 결과 드리프트층의 농도에 따른 온 저항 특성에서는 이중 트렌치 게이트 구조가 상당히 우수한 특성을 보여주고 있고, 드리프트층의 깊이 따른 항복전압 특성도 200 V 이상의 우수한 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이중 트렌치 게이트 전력 MOSFET 소자는 1,700 V급뿐만 아니라 그 이상의 전압대에서도 적용할 수 있으며, 현재 전기자동차 및 에너지 신산업 분야에 적용되고 있는 Si 소자를 모두 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

ORCID

Ey Goo Kang

<https://orcid.org/0000-0001-7600-7303>

감사의 글

본 논문은 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재양성사

업(P00 17308)과 한국산업기술평가원의 소재부품기술사업(20022501)의 지원에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- [1] B. S. Ahn, H. S. Chung, E. S. Jung, S. J. Kim, and E. G. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 187 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.3.187>]
- [2] J. M. Geum, E. S. Jung, E. G. Kang, and M. Y. Sung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 253 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.4.253>]
- [3] K. Sano and S. Kurihara, *Phys. C*, **352**, 223 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)01730-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)01730-5)]
- [4] E. G. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 497 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.8.497>]
- [5] M. C. Shin, H. S. Chung, B. S. Ahn, H. F. Cui, S. Y. Kim, and E. G. Kang, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 1670, (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16207>]
- [6] E. G. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 210 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.4.210>]
- [7] H. S. Chung and E. G. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 496 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.8.496>]
- [8] Y. S. Jeong and S. M. Koo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 345 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.6.345>]
- [9] J. H. Kim and K. S. Kim, *Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **23**, 756 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.3.756>]