

# 트렌치 게이트를 이용한 Floating Island IGBT의 전기적 특성에 관한 고찰

조유습<sup>1</sup>, 정은식<sup>1</sup>, 오금미<sup>1</sup>, 성만영<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 전기공학과

## Electrical Characteristics of Floating Island IGBT Using Trench Gate Structure

Yu Seup Cho<sup>1</sup>, Eun-Sik Jung<sup>1</sup>, Kum-Mi Oh<sup>1</sup>, and Man-Young Sung<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received March 16, 2012; Revised March 21, 2012; Accepted March 22, 2012)

**Abstract:** IGBT (insulated gate bipolar transistor) has been widely used around the power industry as it has good switching performance and its excellent conductance. In order to reduce power loss during switch turn-on state, it is essential to reduce its resistance. However, trade off relationship between breakdown voltage and device conductance is the greatest obstacle on the way of improvement. Floating island structure is one of the solutions. Still, under optimized device condition for the best performance, improvement rate is negligible. Therefore, this paper suggests adding trench gate on floating island structure to eliminate JFET (junction field effect transistor) area to reduce resistance and activate floating island effect. Experimental result by 2D simulation using TCAD, shows 20% improvement of turn-on state voltage drop.

**Keywords:** Floating island, Trench gate, IGBT, Power semiconductor device

### 1. 서 론

파워 반도체 소자는 고전압 또는 고전류용 스위치 역할을 하는 대부분의 반도체 소자를 통칭한다. 예를 들어 정류 다이오드, BJT (bipolar junction transistor), thyristor, power MOSFET (metal oxide silicon field effect transistor), IGBT (insulated gate bipolar transistor) 등의 형태로 자동차, 전철 등의 교통기기에서부터 사무기기, 통신기기, 사무용품, 가전제품, 휴대기기 등에까지 전력 조정, 출력단 제어 등이 필요한 거의 모든 전자제품에 사용되고 있다 [1].

많은 반도체 소자 중 IGBT는 현재 개발된 전력용 소자 중 고전압, 고전류에 적합한 파워 반도체 소자로서 각광 받는다. 이는 IGBT가 스위칭 특성이 탁월한 MOSFET과 높은 전류 구동 능력, 낮은 순방향 전압강하 특성을 갖는 BJT를 결합한 형태의 구조를 갖고 있기 때문이다 [2].

일반적으로 IGBT 소자의 높은 항복전압 특성 확보를 위해 N-drift 영역의 불순물 도핑 농도를 낮추는 기법을 사용한다. 이러한 기법을 통해 소자의 최대 항복전압은 증가시킬 수 있지만 Turn-on 상태에서의 전압강하가 증가하여 불필요하게 소모되는 전력량이 늘어난다 [2,3]. 최근 전력전자 산업의 발전으로 인해 갈수록 높은 전압 레벨의 파워 반도체 소자가 요구됨

에 따라, 더욱 높은 항복전압 확보를 위한 N-drift 드리프트 영역 길이의 확장이 불가피해졌다. 이러한 동향에 따라 Turn-on 상태 저항으로 인한 전압강하도 증가하여 전력소모 역시 필연적으로 증가하게 되었다. 따라서, 소자 설계의 최적화 및 새로운 구조 개발을 통해 높은 항복전압을 확보함과 동시에 Turn-on 상태 전압강하를 줄이는 것이 파워 반도체 소자에서 가장 중요한 테마로 연구되고 있다.

이처럼 항복전압이 높아질수록 파워 반도체 소자의 전도도가 감소하는 트레이드 오프 (trade-off) 관계를 개선하기 위해, super junction 구조와 floating Island 구조가 제안되었다 [4]. 그러나 super junction 구조는 깊은 트랜치 공정 및 charge balancing을 위한 epitaxy 공정 등 floating island 구조에 비해 대단히 복잡하고 높은 수준의 공정 기술이 요구된다 [5]. 따라서 본 논문은 상대적으로 공정이 간단한 floating island 구조를 갖는 IGBT에 초점을 맞추어 FLI (floating island) IGBT의 더욱 높은 항복전압 확보와 Turn-on 상태 전압강하 감소를 위해 trench gate를 적용한 FLI IGBT를 제안하고 그 전기적 특성을 TCAD를 이용한 2D 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

## 2. 실험 방법

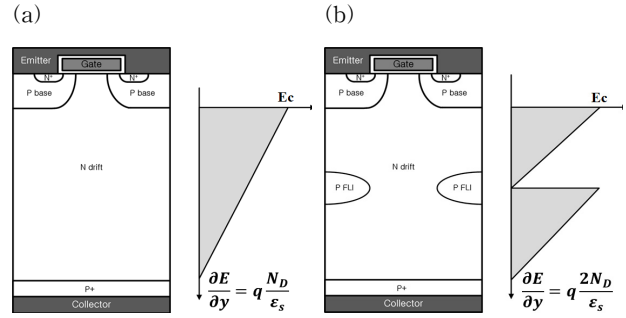
### 2.1 FLI 구조의 Turn-on 전압강하 특성 개선 원리

파워 반도체 소자의 항복 전압은 수식 (1)에 의해 도출된다.

$$\text{Breakdown Voltage} = \int_0^{N\text{-drift}} E(y) dy \quad (1)$$

다시 말해 항복전압은 N-drift 영역에 인가되는 전기장의 넓이라고 할 수 있다. 그림 1은 conventional IGBT와 floating island IGBT의 Turn-off 상태에서의 전계분포를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 두 IGBT의 전계는 같은 넓이를 가진다. 즉, 각 IGBT가 견딜 수 있는 최대 전압은 같다. 한편, poisson 방정식 (2)에 의해 수식 (3)을 도출할 수 있다.

$$-\frac{\rho_{\text{charge}}}{\epsilon_s} = -\frac{dE(y)}{dy} = \frac{d^2 V(y)}{dy^2} \quad (2)$$



**Fig. 1.** Turn-off state electric field distribution of (a) conventional IGBT and (b) floating island IGBT [7].

$$\frac{dE(y)}{dy} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad (3)$$

여기서 수식 (3)에 의해 IGBT에 인가되는 전기장의 기울기는 N-drift 영역의 도핑농도인  $N_D$ 와 비례함을 알 수 있다. 따라서 FLI IGBT는 conventional IGBT 보다 높은 도핑 농도, 즉 낮은 저항으로도 동일한 항복전압을 확보할 수 있게 되는 것이다 [6].

한편, trench gate 형태의 파워 반도체 소자는 planar gate에 존재하는 JFET 영역을 trench gate로 대체함으로써 반도체 소자의 저항을 전반적으로 크게 낮춰주므로 IGBT의 Turn-on 상태 전압강하를 줄여준다. 그러므로 floating island 구조와 더불어 trench gate형태의 IGBT의 특성은 conventional IGBT 및 planar gate FLI IGBT 보다 더 우수할 것으로 예상된다.

### 2.2 Trench gate FLI IGBT의 설계

Conventional IGBT, planar gate FLI IGBT, trench gate FLI IGBT의 직접적인 비교를 위해 동일한 N-drift의 길이 및 문턱전압을 갖는 조건으로 각각의 소자를 설계하였다. IGBT는 태양열 발전 컨버터, 초고속 엘리베이터 등에 사용되는 최적화된 1,200 V급 IGBT를 선택하였다. 그림 2(a)와 표 1에서 conventional IGBT의 구조와 그 design parameter를 나타내었고, 이를 Tsuprem4 simulator로 구현하였다. 또한 동일한 1,200 V급 IGBT의 구조를 이용하여 FLI 구조와 trench gate FLI IGBT를 설계하였다. 이를 각각 그림 2(b)와 그림 2(c)에 도시하고 design

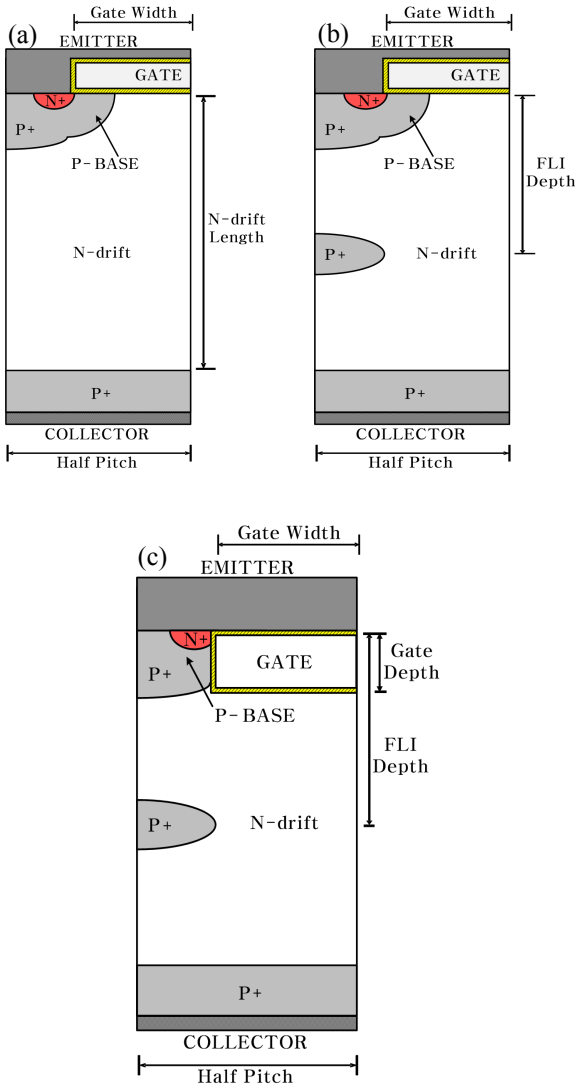


Fig. 2. Structure of (a) conventional IGBT, (b) planar gate FLI IGBT, and, (c) trench gate FLI IGBT.

parameter를 표 1에 나타내었다.

Floating island의 깊이는 기존에 설계된 1,200 V급 FLI IGBT를 기준으로 가장 성능이 좋게 나타난 75  $\mu\text{m}$  깊이에 위치하게 하였고, dose량은  $5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , floating island 제작을 위한 마스크 폭은 cell pitch의 25% 크기인 3.75  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다 [7]. 또한, 모든 IGBT의 문턱전압을 5 V로 동일하게 P-base dose량을 조절하였고, trench gate IGBT의 경우 표 2에서와 같이 1,200 V급 trench gate IGBT에서 가장 높은 항복전압 특성을 보이는 4  $\mu\text{m}$ 의 gate 깊이를 사용하였다.

Table 1. Design parameters of conventional, planar gate FLI and trench gate FLI IGBT.

Design Parameters	Conventional	Planar Gate	Trench Gate
Half Pitch		15 $\mu\text{m}$	
Gate Width		10 $\mu\text{m}$	
N-drift Length		180 $\mu\text{m}$	
N-drift Resistivity		60 $\Omega \text{ cm}$	
P-base Dose		$6.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	
N+ Dose		$1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$	
P+ Dose		$3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	
FLI Dose		$5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
FLI Depth		75 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$
Gate Depth			4 $\mu\text{m}$

Table 2. Breakdown voltage characteristic of trench gate IGBT.

N-drift Resistivity ( $\Omega \text{ cm}$ )	Gate Depth ( $\mu\text{m}$ )	Breakdown Voltage (V)
60	4	1,447
	5	1,431
	6	1,432
	7	1,089
	8	1,337

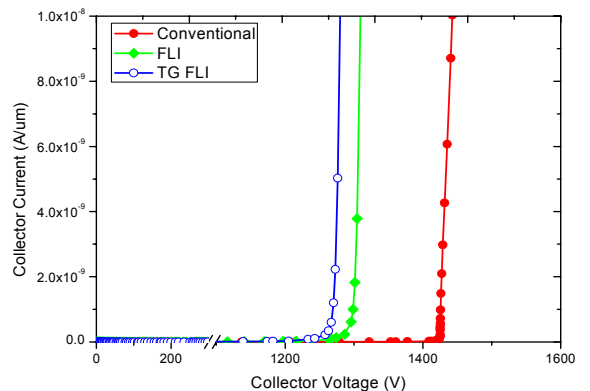


Fig. 3. Breakdown voltage of IGBTs with same resistivity.

**Table 3.** Breakdown voltage and Turn-on state voltage drop characteristic of IGBTs.

IGBTs	Turn-on State Voltage Drop (V)	Breakdown Voltage (V)
Conventional	2.4	1,443
Planar Gate FLI	2.4	1,312
Trench Gate FLI	2.0	1,281

이와 같이 설계된 세 가지 IGBT의 가장 중요한 전기적 특성인 항복전압 및 Turn-on 상태 전압강하 특성을 Medici를 사용하여 시뮬레이션으로 그 결과를 도출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실험 결과 및 전기적 특성 분석

#### 3.2 동일한 비저항에 따른 항복전압 특성

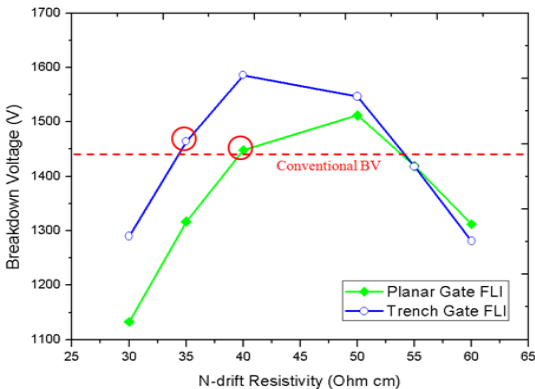
표 3은 N-drift의 비저항값 60 Ωcm를 갖는 설계된 세 가지 IGBT의 항복 전압과 100 A/cm<sup>2</sup> 기준 전압 강하를 나타낸 표이다. 그림 3과 표 3에서와 같이 conventional IGBT는 1,443 V의 항복전압과 2.4 V의 전압 강하를 보인다. 이에 비해 FLI IGBT와 trench gate FLI IGBT는 각각 1,312 V, 1,281 V의 항복전압과 2.4 V, 2.03 V의 전압강하를 보이고 있다. 같은 조건에서 항복전압 특성이 저하된 것은 파워 반도체 소

자에 인가된 전기장이 소자 전반에서 균일하지 않게 분포되었기 때문이다. 특히 과도한 전기장이 가해진 점이 critical electric field에 도달하였을 경우 breakdown 현상이 발생하여 소자에 전류가 흐르게 되고, 이것은 소자의 항복전압 특성 저하로 이어진다 [2]. 따라서 반도체 소자의 항복전압 특성을 극대화하기 위해서는, Turn-off 상태에 인가된 전기장의 분포가 critical electric field 값에 도달하지 않도록 가능한 균일하게 만드는 것이 중요하다. 한편, 전압 강하 특성은 trench gate FLI IGBT의 경우 JFET 영역이 차지하는 저항을 제거한 효과가 크게 나타나는 반면, planar gate FLI IGBT의 전압강하 특성은 conventional IGBT와 동일한 비저항으로 인해 변하지 않음을 알 수 있다.

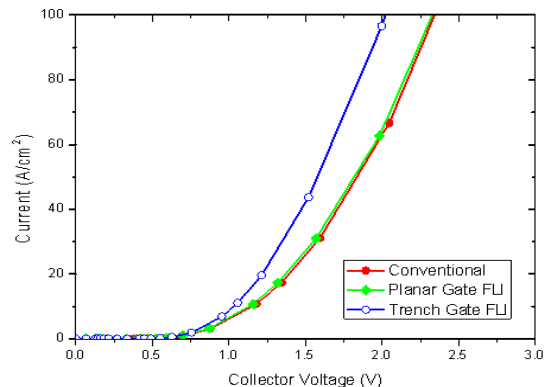
#### 3.3 동일한 항복전압에 따른 Turn-on 상태 전압강하 특성

위 simulation 결과에 따라 파워 반도체 소자 전반에 인가된 전기장 분포를 균일화하기 위해 parameter를 조정하면서 소자의 항복전압 특성 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 poisson 방정식에 의해 확인하였듯이, FLI층을 삽입한 구조를 이용하면 불순물 도핑 농도를 높여야 전기장의 분포가 균일해진다. 따라서 N-drift층의 비저항을 낮추는 방향으로 parameter를 조정하였다. N-drift층의 비저항을 60 Ωcm 부터 30 Ωcm까지 단계적으로 낮추면서 소자의 항복전압을 측정하였다.

그림 4는 두 FLI IGBT의 비저항 값에 따른 항복 전압을 나타낸다.



**Fig. 4.** Breakdown voltage variation according to N-drift resistivity of planar and trench gate IGBT.

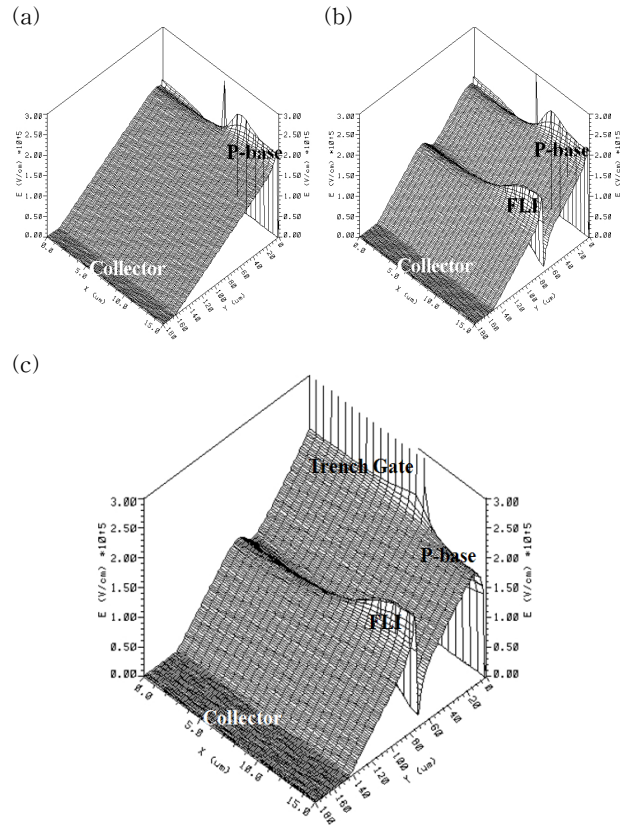


**Fig. 5.** Turn-on state voltage drop of IGBTs with same breakdown voltage.

**Table 4.** Breakdown voltage and Turn-on state voltage drop characteristic of IGBTs with different resistivity.

IGBTs	N-drift Resistivity ( $\Omega \text{ cm}$ )	Breakdown Voltage (V)	Turn-on Voltage Drop (V)
Conventional	60	1,443	2.4
Planar Gate FLI	40	1,448	2.3
Trench Gate FLI	35	1,464	2.0

동일한 항복전압에 따른 Turn-on 전압강하 특성을 알아보기 위해 conventional IGBT의 항복전압인 1,443 V에 가까운 값을 갖는 비저항을 선택해야 한다. Planar gate의 경우 40  $\Omega \text{ cm}$ , trench gate의 경우 35  $\Omega \text{ cm}$ 일 때 conventional IGBT의 항복전압과 가까운 값을 보였다. 이때의 Turn-on 상태 전압강하 특성을 표 4에 각각 나타내고 비교하였다. 동일한 항복전압을 갖는 각 IGBT의 Turn-on 상태 전압강하 특성은, 100  $\text{A}/\text{cm}^2$ 의 전류가 흐를 때를 기준으로 conventional IGBT에 비해 planar gate FLI IGBT는 0.5%, trench gate FLI IGBT는 20% 가량 향상된 결과를 얻을 수 있었다. Planar gate FLI IGBT가 상대적으로 미약한 특성 향상 결과를 보인 것은 JFET 영역의 높은 저항에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 N-drift층의 도핑 농도를 높였을 때 소자의 저항은 감소한다. 하지만 simulation에서 N-drift층의 도핑 농도를 높였음에도 소자의 저항이 감소하지 않았다. 이로 미루어 볼 때, conventional IGBT의 저항 성분은 JFET 영역이 대부분을 차지할 것으로 결론지을 수 있다. 따라서 이와 같이 JFET 영역의 저항 성분만 존재하는 IGBT의 저항을 더욱 낮추려면 trench gate 형태의 IGBT를 사용해야 할 것이다. 한편, 그림 6에서 각 IGBT의 인가된 전기장 분포를 3D로 나타내었다. 여기서 확인할 수 있듯이 소자에 인가되는 전기장의 최고점은 FLI층에 의해 나누어지게 되고, 소자에 인가된 전기장의 기울기는 커진다. 그에 따라 Turn-off 상태에서 소자의 N-drift층에 생성되는 공핍층의 길이가 줄어든다. 표 5에서 알 수 있듯, conventional IGBT, planar gate FLI IGBT 그리고 trench gate FLI IGBT에 생성되는 공핍층의 길이는 각각 160  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 140  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 다시 말해 동일한 항복전압을 견디는 공핍층의 길이가 줄어들어

**Fig. 6.** 3D electric field distribution of (a) conventional IGBT, (b) planar gate IGBT, and (c) trench gate IGBT.**Table 5.** Depletion region length of (a) conventional IGBT, (b) planar gate IGBT, and (c) trench gate IGBT.

Depletion Region Length ( $\mu\text{m}$ )	Conventional IGBT	Planar Gate FLI IGBT	Trench Gate FLI IGBT
		160	150

파워 반도체 소자의 N-drift 길이를 줄일 수 있게 되는 것이고, 이로 인해 소자의 저항이 감소하여 불필요한 전력소모를 줄일 수 있다는 결론을 낼 수 있다. 아울러 trench gate FLI IGBT의 경우, 그림 8(c)에서와 같이 gate oxide층이 전기장을 크게 받고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 trench gate 모서리에 전기장이 특히 집중되기 때문이다. 여기서 trench gate를 둘러싸고 있는 실리콘 oxide는 critical electric field가 실리콘에 비해 보통 수십 배 정도 높으므로 더욱 높

은 전압을 견딜 수 있다. 이로 인해 비교된 다른 소자에 비해 20 V 정도 높은 항복전압 값 특성을 얻게 되었다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 floating island 구조를 가진 IGBT의 전기적 특성 향상을 위해 trench gate 구조를 추가로 제안하여 그 항복전압과 Turn-on 상태 전압강하 특성을 소자 시뮬레이션으로 확인하고 분석하였다. 그 결과, JFET 영역의 저항 성분만을 가진 최적화된 산업용 IGBT의 경우 FLI 구조를 도입해도 그 효과가 미미하였다. 따라서, trench gate 구조를 FLI 구조와 병행할 때 동일한 항복전압 특성뿐만 아니라 추가적으로 소자의 길이를 줄여 낮은 저항 확보할 수 있다는 결과를 얻었다.

제안된 구조의 Turn-on 상태 전압강하는 100 A/cm<sup>2</sup>의 전류가 흐를 때를 기준 2.0 V로써, 이것은 산업용으로

최적화된 conventional IGBT 및 planar gate FLI IGBT에 비해 20%의 향상된 결과값이다.

#### REFERENCES

- [1] E. G. Kang, B. J. Kim, and Y. H. Lee, *J. KIEEME* **23**, 1 (2010).
- [2] B. J. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, Springer, 91 (2008).
- [3] H. S. Lee, Y. H. Kim, E. G. Kang, and M. Y. Sung, *J. KIEEME*, **19**, 907 (2006).
- [4] J. M. Yoon, *Magazine of IEEK*, **37**, 8 (2010).
- [5] Y. S. Cho, J. H. Oh, J. M. Geum, and M. Y. Sung, *Korean Conference on Semiconductors* (Seoul, 2012)
- [6] N. Cezac, F. Morancho, P. Rossel, H. Tranduc, and A. Peyre-Lavigne, *International Symposium on Power Semiconductor Devices, ISPSD* (Toulouse, France, 2000)
- [7] E. S. Jung, Y. S. Cho, E. G. Kang, and M. Y. Sung, *JEET*, **7**, 3 (2012).