

# Trapezoid mesa와 Half Sidewall Technique을 이용한 4H-SiC Trench MOS Barrier Schottky(TMBS) Rectifier

## A 4H-SiC Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) Rectifier using the trapezoid mesa and the upper half of sidewall

김 병 수\*, 김 광 수\*\*

Byung-Soo Kim\*, Kwang-Soo Kim\*\*

### Abstract

In this study, an 4H-SiC Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) rectifier which utilizes the trapezoid mesa structure and the upper half of the trench sidewall is proposed to improve the forward voltage drop and reverse blocking voltage concurrently. The proposed 4H-SiC TMBS rectifier reduces the forward voltage drop by 12% compared to the conventional 4H-SiC TMBS rectifier with the tilted sidewall and improves the reverse blocking voltage by 11% with adjusting the length of the upper sidewall. The Silvaco T-CAD was used to analyze the electrical characteristics.

### 요 약

본 논문에서는 전력반도체 소자의 재료로써 주목받고 있는 탄화규소 기반의 Trench MOS Barrier Schottky(TMBS)의 순방향 및 역방향 특성을 개선시키기 위한 구조를 제안한다. 순방향 전압강하와 역방향 항복 전압을 개선시키기 위하여 사다리꼴 mesa 구조와 trench sidewall의 길이를 조절하는 기법을 사용하는 4H-SiC TMBS 정류기를 제안하고 있다. 제안된 구조는 사다리꼴 mesa 구조를 적용하여 trench sidewall에 경사를 줌으로써 1508V의 역방향 항복전압을 얻었다. 이것은 기존의 4H-SiC TMBS 정류기에 비하여 역방향 항복전압을 11% 개선시켰음을 나타낸다. 또한 trench sidewall 상단의 길이를 조절하여 순방향 전류 200A/cm<sup>2</sup>에 대하여 12% 감소된 1.6V의 순방향 전압강하를 얻었다. 제안된 소자는 Silvaco사의 T-CAD를 사용하여 전기적 특성을 분석하였다.

*Key words* : Silicon Carbide, 4H-SiC, TMBS, Schottky rectifier, Power device.

## I. 서론

Silicon Carbide(SiC)는 우수한 물성 때문에 전자산업

\* Dept. of Electronic Engineering, Sogang University

kimbs@sogang.ac.kr 010-8889-3659

★ Corresponding author

※ This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT&Future Planning), Korea, under the University ITRC support program (NIPA-2013-H0301-13-1007) supervised by the NIPA (National IT Industry Promotion Agency).

Manuscript received Oct. 24, 2013; revised Nov. 19, 2013 ; accepted Nov. 20, 2013

에서 전력 소자의 재료로써 주목받고 있다 [1]. SiC의 낮은 intrinsic carrier 농도, 10배 이상 높은 파괴 전계, 3배 이상 높은 열전도도, 큰 포화 전자 드리프트 속도 등의 우수한 물리적 특성들 때문에 고 전력, 고온, 고주파 응용분야에서 가능성 있는 반도체 재료로 여겨지고 있다 [2]. 특히 SiC 쇼트키 정류기는 높은 역방향 항복전압, 빠른 스위칭 속도를 갖는 고전압 응용에서 스위칭 손실을 줄이기 위한 매력적인 소자이다 [3]. 하지만 SiC 쇼트키 정류기는 Si 쇼트키 정류기와 비교했을 때, 높은 순방향 전압강하를 가진다. 그 이유는 실리콘 보다 높은 항복전압을 구현하기 위하여 누설전류를 효과적으로 막는 높은 쇼트키 장벽이 필요하기 때문이다. 낮은 순방향 전압 강하를 얻기 위해서는 낮은 쇼트키 장벽이 요구되며, 낮은 쇼

트키 장벽에서 높은 항복전압과 낮은 누설전류 특성을 유지하기 위하여 표면의 전계를 줄이는 것은 소자 설계의 핵심이라고 할 수 있다 [4]. 낮은 장벽 영역을 pinch-off 시키거나 전기적으로 차단하는 쇼트키 pinch rectifier는 표면의 전계를 줄일 수 있는 해결책 중 하나로 인식되어져 왔다 [7]. Junction Barrier Schottky (JBS) rectifier[5], Trench MOS barrier Schottky (TMBS) rectifier[6], Dual Metal Trench (DMT) rectifier 등을 포함하는 다양한 구조의 pinch rectifier가 연구되어져 왔다 [7]. 그 중에서 TMBS rectifier와 JBS rectifier는 전력 쇼트키 소자 구조의 혁신적인 발전으로 인식되어져 왔다 [8]. TMBS rectifier에서 항복 파괴는 trench의 하단에서 발생하게 되는데, 그 이유는 trench 모서리 근처에 집중되는 높은 전계가 높은 항복전압을 구현하는데 어려움을 야기하기 때문이다 [6]. 따라서 역방향 항복전압 특성의 향상을 위해서 trench 모서리 근처에 집중되는 전계제한이 요구된다.

## II. 본론

### 1. 제안된 소자 및 공정

본 논문에서 사용하고자 하는 trapezoid mesa 구조는 trench 모서리에 집중되는 높은 전계를 제한하기 때문에 높은 항복전압을 얻을 수 있다 [9]. 하지만 trapezoid mesa 구조를 사용할 경우 기존의 TMBS rectifier 보다 순방향 전압강하가 높아지게 되는 단점이 있으며, 그 이유는 trench sidewall을 tilt 시킴에 따라서 schottky contact 영역이 줄어들기 때문이다 [9]. 이러한 문제점은 trapezoid mesa 구조를 4H-SiC를 기반으로 설계하였을 시에도 나타날 수 있다. 이를 극복하기 위해서 본 연구에서는 trapezoid mesa 구조에 trench sidewall의 상단의 길이를 조절하는 방법을 적용하여 active 영역을 확장시킴으로써 순방향 특성을 개선시키고자한다 [10]. Fig 1에 본 논문에서 제안한 rectifier 구조를 나타내었으며, Silvaco사의 T-CAD를 사용하여 제안된 구조와 기존의 구조의 전기적 특성을 비교 분석하였다.

그림 2는 제안된 소자 4H-SiC TMBS rectifier의 공정 흐름도 이다. 그림 2(a)는 고농도로 n+ 4H-SiC 기판위에  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 의 도핑 농도를 가진 4H-SiC epilayer를  $8\mu\text{m}$ 의 두께로 성장시킨다. 이후 RIE(Reactive Ion etching) 공정을 사용하여  $1\mu\text{m}$ 의 깊이와  $3\mu\text{m}$ 의 넓이를 가지는 trench를 형성시킨다. trench 식각 후에  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 deposition한다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  layer와 같은 두께의  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 RIE에 대한 barrier로 사용하여  $\text{Si}_3\text{N}_4$  layer를 trench sidewall 주위만 남겨두고 나

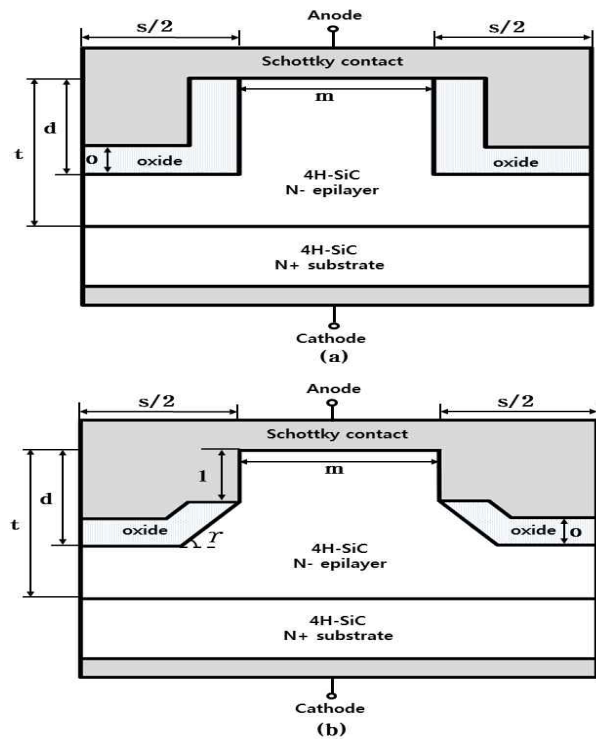


Fig 1. Cross-sections of (a) conventional TMBS rectifier in 4H-SiC and (b) proposed structure.  
그림 1. (a) conventional TMBS rectifier in 4H-SiC and (b) proposed TMBS rectifier의 단면도

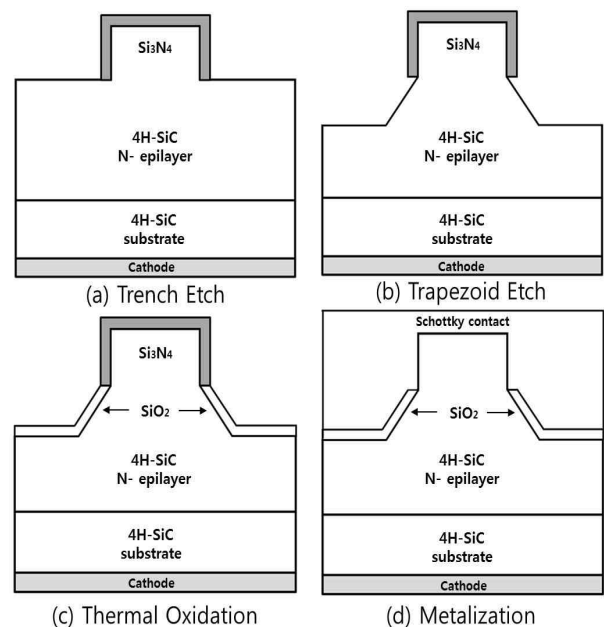


Fig 2. Fabrication procedure of the proposed 4H-SiC TMBS rectifier  
그림 2. 제안된 4H-SiC TMBS rectifier의 공정 순서

머지 부분을 식각한다. 그림 2(b)는 analytical etch model을 사용하여 경사진 trench bottom 영역이 형성된 모습을 보여준다. 경사진 trench bottom 영역 위에 oxidation 공정을 사용하여 0.1 $\mu\text{m}$  두께의 oxide layer를 형성시킨 것이 그림 2(c)에 나타나있다. 이와 같은 공정을 진행 한 후에 barrier로 사용된  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 제거하게 그 위에 schottky 금속을 deposition 하게 된다. 위에서 언급한 소자의 공정과정은 Silvaco TCAD를 사용하여 수행되었다.

2. TMBS rectifier의 전기적 특성

Table 1. Process parameters of proposed 4H-SiC TMBS

표 1. 제안된 4H-SiC TMBS의 주요 공정 변수

공정 변수	값
Mesa width (m)	0.5 $\mu\text{m}$
Trench width (s)	3 $\mu\text{m}$
Thickness of oxide (o)	0.1 $\mu\text{m}$
Tilt degree (r)	55°
Depth of trench (d)	2 $\mu\text{m}$
Thickness of epi-layer (t)	8 $\mu\text{m}$
Length of reduced sidewall (l)	1 $\mu\text{m}$

기존의 TMBS rectifier의 경우 Si TMBS rectifier의 전형적인 구조를 4H-SiC를 기반으로 설계하였다. 제안된 구조와의 효과적인 비교를 위하여 trench sidewall 상단의 길이, trench 하단의 경사도를 제외한 나머지 주요 공정변수들은 차이를 두지 않았다. Trench 하단의 경사도의 경우 각도의 변화에 따른 성능의 변화를 관찰하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 소자들의 주요 공정변수들을 보여준다.

제안된 4H-SiC TMBS rectifier와 기존의 TMBS rectifier의 각각의 순방향 전압강하 및 역방향 항복전압 성능을 Silvaco Atlas를 통하여 비교하였다.

가. 순방향 특성

그림 3은 제안된 4H-SiC TMBS rectifier와 기존의 TMBS rectifier의 순방향 특성을 보여준다. 제안된 4H-SiC TMBS rectifier와 기존의 TMBS rectifier의 순방향 특성 그래프를 통하여 200A/cm<sup>2</sup>에서 순방향

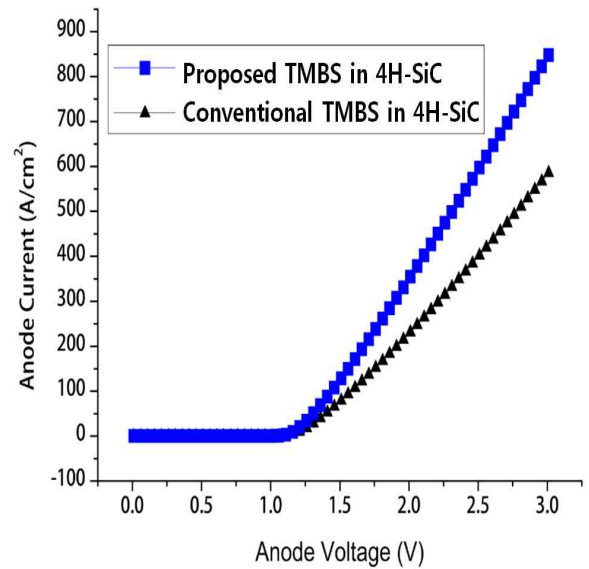


Fig 3. Forward characteristics of the common TMBS in 4H-SiC and proposed TMBS in 4H-SiC  
그림 3. common 4H-SiC TMBS 와 제안된 4H-SiC TMBS rectifier의 순방향 특성

전압 강하를 살펴본 결과 각각 1.6V 와 1.9V을 얻었다. 이 결과는 순방향 전압 강하에서 약 12%의 성능향상을 나타낸다. 기존의 TMBS rectifier의 경우 trench sidewall위에 oxide layer가 덮고 있는 구조를 가지고 있기 때문에 active 영역의 감소가 불가피 하였다. 이는 소자의 전류 조절 능력을 감소시키는 결과를 초래하게 되고 결과적으로 순방향 특성의 저하를 가져 온다 [10]. 본 논문에서는 active 영역의 확장을 위하여 trench sidewall의 oxide layer의 길이를 줄이는 기술을 채택하여 전류 특성의 향상을 기대하였다 [10]. 제안된 소자의 경우 sidewall의 상단의 oxide 영역의 길이를 1 $\mu\text{m}$  감소 시켰으며, 이를 통하여 기존 TMBS rectifier의 순방향 전압강하 1.9V 와 비교하여 낮아진 1.6V의 전압강하를 얻었다. 그림 4는 기존 TMBS rectifier와 제안된 rectifier에서의 active 영역에서의 순방향 전류 흐름을 보여준다. 그림 (a)에서 보이는 것과 같이 기존 TMBS diode의 경우 MOS trench 구조에 의하여 active 영역이 감소된 것을 볼 수 있다. 반면에 그림 (b)의 경우 줄어든 sidewall로 인하여 active 영역이 증가한 것을 확인 할 수 있다. Active 영역을 확장시킴으로써 mesa 영역의 확장과 비슷한 효과를 얻은 결과는 기존의 연구들의 결과와 맥락을 같이 한다 [10].

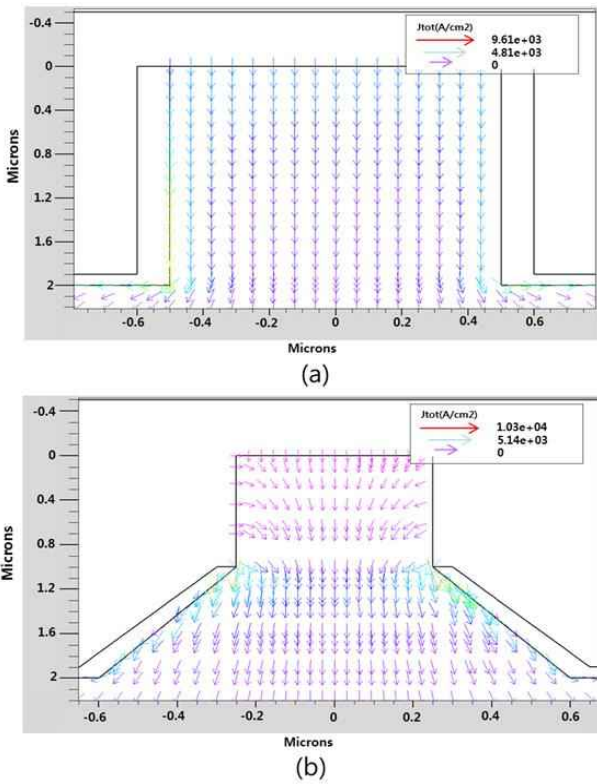


Fig 4. Forward current flow in the active area of (a) common and (b) proposed TMBS  
그림 4. 기존 TMBS rectifier와 제안된 구조에서의 active 영역에서의 순방향 전류 흐름

나. 역방향 특성

그림 5는 역방향 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 기존 4H-SiC TMBS rectifier가 1351V의 항

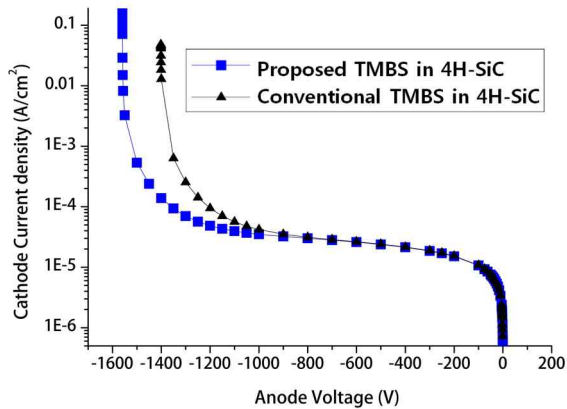


Fig 5. Reverse characteristics of the conventional TMBS in 4H-SiC and proposed TMBS in 4H-SiC  
그림 5. common 4H-SiC TMBS 와 제안된 4H-SiC TMBS rectifier의 역방향 특성

복전압을 보여주는 반면에 제안된 4H-SiC TMBS rectifier는 1508V의 항복전압을 보여 줌으로써 약 11%의 역방향 성능의 향상을 보여주고 있다. 기존 TMBS rectifier는 쇼트키 접합 부근을 pinch-off 시킴으로써 표면의 전계를 낮추어 planar SBD(Schottky Barrier Diode)에 비하여 높은 항복전압을 가져갈 수 있는 장점이 있다. 하지만 trench 구조 하단의 모서리에 집중되는 전계는 항복전압의 감소의 원인이 될 수 있다 [9]. 이를 극복하기 위하여 제안된 소자는 trench sidewall을 기울여 하단의 모서리에 집중되는 전계를 분산시킴으로써 높은 항복전압을 얻을 수 있는 technique을 사용하였다 [9].

다. Tilt angle 변화에 따른 역방향 항복전압 특성

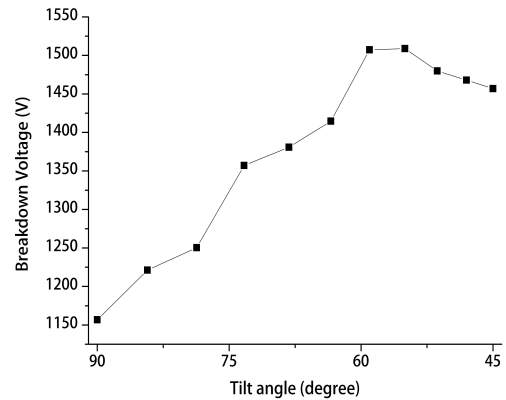


Fig 6. Breakdown voltage as the variation of tilt degree in proposed structure  
그림 6. 제안된 소자의 tilt angle에 따른 항복 전압

제안된 4H-SiC TMBS rectifier의 특성에 가장 큰 영향을 주는 중요한 공정변수 중 하나는 trench sidewall의 경사도 이다. 그림 6은 경사도의 변화에 따른 항복전압과 순방향 전압강하의 변화를 시뮬레이션을 통하여 나타낸 결과이다. 앞에서 언급한 경사도는 그림 1(b)에서  $\gamma$ 를 의미한다. 따라서 90°는 기존의 TMBS rectifier와 동일하게 수직의 trench sidewall을 의미하며 각도가 감소할수록 trench 하단은 trapezoid mesa의 모양을 가지게 된다. 그림 6의 결과에 따르면, 경사도가 감소할수록 항복전압이 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 경사도가 감소함에 따라서 모서리에 집중되는 전계가 제한되기 때문이다. 경사도가 감소함에 따라서 증가하던 항복전압은 약 55° 이하에서는 감소하는 경향을 보여준다. 이것은 경사도가 감소함에 따라서 trench mesa 영역을 pinch-off 시키는 능력이 감소하기 때문이다.

Table 2. Performance comparison of the common 4H-SiC TMBS rectifier and the proposed 4H-SiC TMBS rectifier

표 2. 기존 4H-SiC 다이오드와 제안된 4H-SiC TMBS의 성능 비교

Parameters	Common TMBS	Proposed TMBS	Improved rate
Forward voltage drop	1.9V	1.6V	12%
Breakdown voltage	1351V	1508V	11%

### III 결론

제안된 4H-SiC TMBS rectifier는 trench sidewall의 상단의 길이를 조절하는 technique를 적용하였다. 제안된 구조의 trench sidewall의 기울기를 변화시켜 시뮬레이션 함으로써 역방향 항복전압과의 관계를 관찰하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 순방향 전압강하를 12% 감소시키는 결과를 확인하였다. 또한 trapezoid mesa technique을 사용하여 trench sidewall 하단 모서리에 집중되는 전계를 제한함으로써 기존의 TMBS rectifier에 비하여 11% 개선된 역방향 항복전압을 확인하였다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 구조는 위의 두 가지 technique을 사용함으로써 순방향 전압 강하와 역방향 항복전압을 동시에 개선시키는 결과를 얻었다.

### References

[[1] R. F. Davis, G. Kelner, M. Shur, J. W. Pamour, J. A. Edmond, "Thin film deposition and microelectronics and optoelectronic device fabrication and characterization in monocrystalline alpha and beta silicon carbide", Proceedings of the IEEE, vol. 79, no. 5, pp. 677-701, May. 1991.

[2] J. M. Bluet, D. Ziane, G. Guillot, D. Tournier b, P. Brosselard, J. Monserrat, P. Godignon, "Barrier height homogeneity for 4.5 kV 4H-SiC Schottky rectifier", Superlattices and Microstructures, vol. 40, no. 10, pp. 399-404, Oct. 2006.

[3] T. Nakamura, Y. Nakano, M. Aketa, R. Nakamura, S. Mitani, H. Sakairi, Y. Yokotsuji, "High Performance SiC Trench Devices with Ultra-low Ron", Electron Device Meeting (IEDM), pp. 26.5.1-26.5.3, Dec. 2011.

[4] B. J. Baliga, "The pinch rectifier: A low-forward-drop high-speed power diode", IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-5, pp. 194 - 196, June. 1984.

[5] S. Kunori, J. Ishida, M. Tanaka, M. Wakatabe, T. Kan, "The low power dissipation Schottky barrier diode with trench structure", in Proc. 1992 Int. Symp. Power Semiconductor Devices & IC's, Tokyo, Japan, pp. 66 - 71.

[6] M. Mehrotra, B. J. Baliga, "Trench MOS barrier Schottky (TMBS) rectifier: A Schottky rectifier with higher than parallel plane breakdown voltage," Solid-State Electron., vol. 38, no. 4, pp. 801 - 806, April. 1995.

[7] K. J. Schoen, J. P. Henning, J. M. Woodall, J. A. Cooper Jr., M. R. Melloch, "A Dual-Metal-Trench Schottky Pinch-Rectifier in 4H-SiC", IEEE Electron Device Lett., vol. 19, no. 4, pp. 97-99, April. 1998.

[8] B. J. Baliga, "Trends in power semiconductor devices", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 43, pp. 1717 - 1731, Oct. 1996.

[9] W. Y. Li, G. P. Ru, Y. L. Jiang, R. Gang, "Trapezoid mesa trench metal-oxide semiconductor barrier Schottky rectifier: an improved Schottky rectifier with better reverse characteristics", Chin. Phys. B, vol. 20, pp. 087304-1-087304-8, April 2011.

[10] J. W. Moon, Y. I. Choi, S. K. Chung, "Modified Trench MOS Barrier Schottky(TMBS)Rectifier", KIEE International transaction on Electrophysics and Applications, vol 5-C, no. 2, pp. 58-62, March. 2005.

---

**BIOGRAPHY**

---

**Kim Byung-soo** (Student member)



2012 : BS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.

2012 ~ present : MS course in Electronic Engineering, Sogang University.

<Research interest>

SiC(Silicon Carbide) power semiconductor device

**Kim Kwang-soo** (Member)



1981 : BS degree in Electronic Engineering, Sogang University.

1983 : MS degree in Electronic Engineering, Sogang University.

1998 : PhD degree in Electronic Engineering, Sogang University.

1983 ~ 1997 : Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

1998 ~ 2005 : Institute for Information Technology Advancement (IITA)

2005 ~ 2008 : Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)

2008 ~ present : Professor, Electronic Engineering, Sogang University

<Research interest>

Power Semiconductor device and fabrication,  
SiC(Silicon Carbide) power semiconductor device