

# 4H-SiC MPS 다이오드의 P 영역 최적화에 관한 연구

## A Study on Optimization of the P-region of 4H-SiC MPS Diode

정 세 웅\*, 김 기 환\*, 김 소 망\*, 박 성 준\*, 구 상 모\*

Se-Woong Jung\*, Ki-Hwan Kim\*, So-Mang Kim\*, Sung-Joon Park\*, Sang-Mo Koo\*

### Abstract

In this work, the merged PiN Schottky(MPS) diodes based silicon carbide(SiC) have been optimized and designed for 1200V diodes by 2D-atlas simulation tool. We investigated the optimized characteristics of SiC MPS diodes such as breakdown voltage and specific on-resistance by varying the doping concentrations of P-Grid/epi-layer and space of P-Grid, which are the most important parameters. The breakdown voltage and specific on-resistance, based on Baliga's Figure Of Merit (BFOM), have been compared with and the SiC-based MPS diodes show improved BFOMs with low values of specific on-resistance and high breakdown voltage. It has been demonstrated 1,200 V SiC MPS diodes will find useful applications in high voltage energy-efficient devices.

### 요 약

탄화규소(Silicon Carbide) 기반의 1200 V급 Merged Pin Schottky(MPS) 다이오드의 구조를 2D-atlas simulation tool을 사용하여 최적화 및 설계하였다. 최적화된 항복전압과 온-저항 값을 얻기 위해 본 소자에서 중요한 파라미터인 P-Grid의 도핑농도와 에피층의 도핑농도를 각각  $2\sim 10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2\sim 10 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  으로 변화시키면서 소자의 전기적 특성을 분석하였으며, 그 후 P-Grid의 Space값을  $1\sim 5 \mu\text{m}$  로 설계하여 이에 따른 항복전압과 온-저항의 값을 확인하였다. 항복전압과 온-저항은 서로 trade-off 관계에 있기 때문에 각 변수에서 도출된 값들을 Baliga's Figure Of Merit (BFOM)식에 대입하여 비교하였다. 그 결과 고전압 소자에 적용 가능한 1200 V급 4H-SiC MPS 다이오드를 최적화 및 설계를 도출하였다.

*Key words : 4H-SiC, Diodes, Breakdown voltage, specific on-resistance, P-Grid, doping concentration*

\* Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

★ Corresponding author

e-mail: [smkoo@kw.ac.kr](mailto:smkoo@kw.ac.kr), tel:02-940-5763

※ Acknowledgment : This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (2015R1D1A1A01056596, 2015K1A3A1A59074209), Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP)(No. B0132-15-1006) and by a Research Grant from Kwangwoon University in 2016.

Manuscript received Apr 26, 2016; revised May 27, 2016; accepted Jun 1, 2016

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.

### I. 서론

최근 친환경 및 그린에너지에 대한 관심이 집중되면서, 전력에너지의 효율적인 사용과 함께 전력변환효율을 높이는 것이 중요하다. 이에 따라 전력변환장치의 핵심 부품인 고효율 저손실 전력반도체 개발이 필수적인 가운데, 탄화규소는 기존 실리콘 대비 높은 전계 특성과 에너지 밴드 갭으로 인하여, 고전압 대전류 조건을 만족하는 향상된 항복 전압과 우수한 주파수 특성 및 온도 특성 그리고 극히 낮은 온-저항 특성을 장점으로 가지고 있어 차세대 고효율 전력반도체용 재료로 대체 될 것으로 예상된다. [1]

4H-SiC MPS 다이오드는 기존 쇼트키 다이오드 대비 항복전압과 누설전류 특성을 향상시킬 수 있는 구조이다. 따라서 전력변환 적용에 중요한 소자로서 널리 연구되고 있다. MPS 다이오드는 에피영역에 쇼트키 접합과 PN접합이 통합된 구조를 가진다. 이러한 구조에서 P-Grid는 누설 전류가 흐를 수 있는 면적을 감소시켜 주기 때문에 쇼트키 다이오드 보다 낮은 누설전류 값을 갖는다. 또한 P-Grid와 N형 반도체 사이에는 PN접합으로 인한 공핍층이 형성됨에 따라 금속과 N형 반도체가 만나는 영역에 집중되는 전계가 상대적으로 감소하며 이는 쇼트키 다이오드 보다 높은 임계전압을 허용한다. [2] 따라서 에피영역의 도핑농도와 두께, P 도핑 영역의 크기와 간격(S)은 항복전압과 온-저항에 영향을 미치는 중요한 파라미터이다. [3]

본 연구에서는 4H-SiC를 기반으로 한 MPS 다이오드 설계 및 P-Grid 간격이 온-상태와 오프-상태에서의 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

### II. 본론

#### 1. 실험 방법

본 연구에서는 4H-SiC MPS 다이오드 구조를 설계하기 위해, 2차원 수치해석에 기반한 시뮬레이터 (Atlas Inc., Silvaco tool)를 사용하여 그림 1의 구조로 설계하였다. n형 기판 ( $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) 위에 두께  $15 \mu\text{m}$  와 농도  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 10 \times$

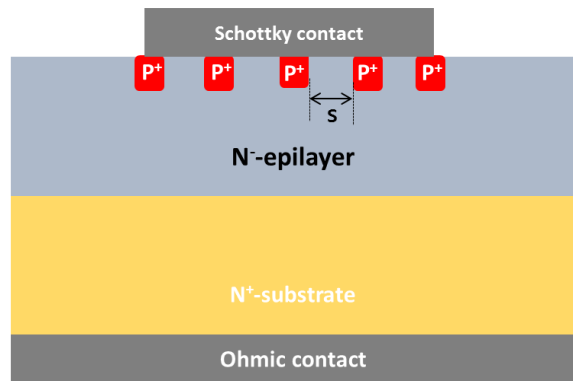


Fig. 1. Structure of the 4H-SiC MPS Diode  
그림 1. 4H-SiC MPS 다이오드 구조

$10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 인 N-type 에피층을 형성하였다. 이어서 4H-SiC MPS 다이오드 동작에 P+영역 간격이 미치는 영향을 알아보기 위해, S를  $1 \mu\text{m}$ 에서  $5 \mu\text{m}$ 로 변화 시켜서 항복전압( $V_B$ ), 비 온-저항( $R_{on,sp}$ )의 전기적 특성을 분석했다.

#### 2. 결과 및 고찰

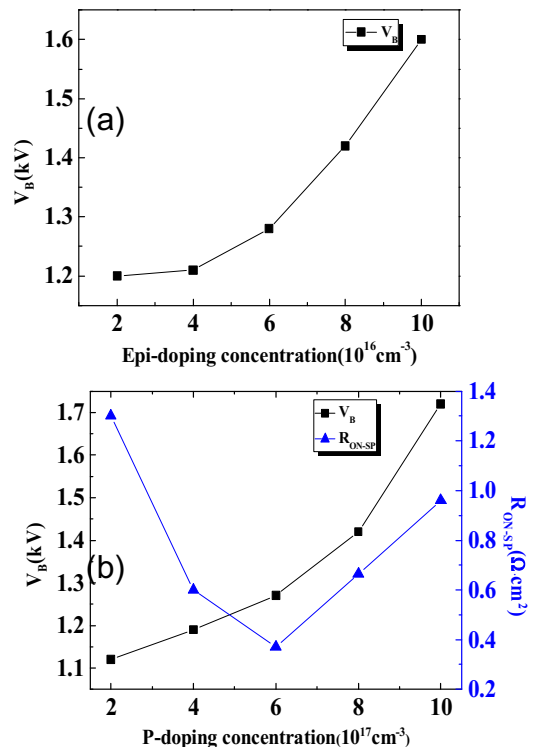


Fig. 2. (a) The breakdown voltage vs epi-doping concentration (b) The breakdown voltage and on-resistance vs P-Grid doping concentration  
그림 2. (a) 에피영역의 도핑농도에 따른 항복전압 (b) P-Grid의 도핑농도에 따른 항복전압과 온-저항

그림 2. (a)는 N-에피층 도핑농도에 따른 항복 전압 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 에피층의 농도가  $2 \times 10^{16}$ 에서  $10 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 로 증가함에 따라,  $V_B$ 는 1,200 V에서 1,600 V로 증가하였다. 에피층의 두께가 동일할 때, 에피층의 농도 증에 따라  $V_B$ 가 증가하는 것은 식 (1)을 통해 알 수 있다. 하지만, 에피층 농도가  $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  이상 증가하게 되면  $R_{on,sp}$ 도 증가되는 것을 확인했다. 따라서 P-Grid 도핑농도와 의 관계를 고려해야 한다.

$$W \approx \sqrt{\frac{2\epsilon V_B}{qN_D}} \quad (1)$$

(b) P-Grid 도핑농도도  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 에서  $10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 증가할수록  $V_B$ 는 1,120 V에서 1,720 V로 증가했고.  $R_{on,sp}$ 은 P-Grid의 도핑농도가  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 일 때,  $370 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 가장 낮음을 확인 할 수 있었다.

BFOM은  $BFOM = V_B^2 / R_{on,sp}$ 의 수식을 이용하여 구할 수 있다. 각각의 값을 BFOM으로 계산한 결과, P-Grid과 에피영역의 도핑농도가  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때,  $5.36 \text{ MW/cm}^2$ 로 가장 높았고,  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때  $0.34 \text{ MW/cm}^2$ 로 가장 낮았다. 따라서 P-Grid과 에피영역의 도핑농도가 각각  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 BFOM 값이  $5.36 \text{ MW/cm}^2$ 로 최적화된 값이라고 볼 수 있다 [4].

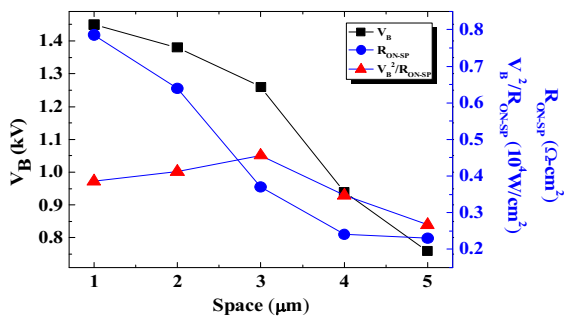


Fig. 3. The breakdown voltage, on-resistance and FOM via P-Grid space

그림 3. P-Grid의 간격에 따른 항복전압과 온-저항, FOM

그림 3은 MPS 다이오드 P-Grid의 간격(S)에 따른 소자 특성이다. S가 증가할수록 쇼트키 콘택 비율이 증가하므로  $V_B$ 와  $R_{on,sp}$ 이 감소하게 되는 trade-off 관계가 발생한다. 따라서 BFOM 비

교분석을 통해 P-Grid의 S 값이  $3 \mu\text{m}$ 일 때  $R_{on,sp}$ 은  $370 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,  $V_B$ 는 1,300 V, BFOM값은  $4.56 \text{ MW/cm}^2$ 로 가장 높다는 것을 확인 수 있다.

### III 결론

본 연구에서는 전력변환 적용에 중요한 소자인 4H-SiC MPS 다이오드 소자의 trade-off 관계인  $V_B$ 와  $R_{on,sp}$ 를 최적화하기 위해 2차원 수치해석 기반 시뮬레이션을 수행하였다.

P-Grid과 N-에피층 도핑농도는 PN접합의 공핍층에 영향을 미치므로 변화에 따라 온특성과 항복특성이 변화한다. P-Grid과 N-에피층 도핑농도는 각각  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 BFOM 값이 최적화된 값( $5.36 \text{ MW/cm}^2$ )을 나타냈다. P-Grid의 간격은 쇼트키 콘택 비율에 영향을 미치므로 온특성과 항복특성이 trade-off 관계를 가지게 된다. P-Grid의 간격이  $3 \mu\text{m}$ 일 때, 높은  $V_B$ 와 BFOM을 보여 trade-off 면에서 최적화됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 앞으로 전력반도체 소자인 MPS 다이오드 소자의 설계에 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

### References

- [1] Kimimori Hamada *et al.*, "SiC-Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles," *IEEE Transactions on Electron*, vol.62, no.2, pp.278-285, 2015.
- [2] T. Takaku, H. Wang, N. Matsuda, S. Igarashi, T. Nishimura, S. Miyashita, O. Ikawa, "Development of 1700V Hybrid Module with Si-IGBT and SiC-SBD for High Efficiency", *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, 2015, pp. 844-849.
- [3] Lin Zhu *et al.*, "Design, fabrication, and characterization of low forward drop, low leakage, 1-kV 4H-SiC JBS rectifiers", *IEEE Transactions on Electron*, vol.53, no.2, pp.363-368, 2006
- [4] Mihai Draghici *et al.*, "A New 1200 V SiC MPS Diode with Improved Performance and Ruggedness", *Silicon Carbide and Related Materials 2014 on Materials Science Forum*, 2014, pp. 608-611.