


분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT의 전기적 특성에 관한 연구

조형성¹, 이장현¹, 리공연², 강이구¹ 

¹ 극동대학교 에너지IT학과

² 국립대만대학교 해양공학과

A Study on Electrical Characteristics of Field Stop IGBT with Separated Gate Structure

HyeongSeong Jo¹, Jang Hyeon Lee¹, Kung Yen Lee², and Ey Goo Kang¹

¹ Department of Energy IT Engineering, Far East University, Eumseong 27601, Korea

² Department Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan

(Received June 24, 2023; Revised August 14, 2023; Accepted October 13, 2023)

Abstract: In this paper, a 1,200 V Si-based IGBT used in electric vehicles and new energy industries was designed. A field stop IGBT with a separate gate structure, which is the proposed structure, was designed to change trench depth and split gate width variables. Then, the general trench structure and electrical characteristics were compared and analyzed. As a result of conducting the trench depth experiment, it was confirmed that the breakdown voltage was the highest at 6 μm , and the on-state voltage drop was the lowest at 3.5 μm . In the separate gate width experiment, it was confirmed that the breakdown voltage decreased as the variable increased, and the on-state voltage drop increased. Therefore, it may be seen that it is preferable not to change the width of the separate gate. In addition, experiments show that there is no difference in on-state voltage drop compared to a structure in which a general field stop structure has a separate gate structure. In other words, it is determined that adding a dummy gate with a separate gate structure to the active cell will significantly improve the on-voltage drop characteristics, while confirming that the on-voltage drop does not change, and while having excellent characteristics in terms of breakdown voltage.

Keywords: IGBT, Field stop, Separated gate, Breakdown voltage, On-state voltage drop, Power devices

1. 서론

현재 Si (실리콘) 기반의 전력 반도체는 한계점에 이르렀다고 알려져 있다. 최근의 전력 반도체 연구는 SiC (실리콘 카바이드)라는 물질로 연구가 진행되고 있다. 하지만 실리콘 카바이드는 실리콘 소자 대비 제조 단가가 높다는 단점이 있다 [1-3]. 실리콘 기반 전력 반도체는 온-저항을 줄이는 방향으로 연구되고 있으며 최근에는 다양한 구조 연구

를 통하여 온-저항을 낮추고 항복전압을 유지하는 방향으로 많이 진행되고 있다 [4-9]. 본 논문에서는 1,200 V급 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT를 제안하며 온-저항을 낮추기 위해 실험을 진행하였다. 분리된 게이트 구조란 일반적인 게이트를 분리하여 그 사이에 산화막으로 채워진 구조라고 볼 수 있다. 이러한 방식은 최근 분리된 게이트의 구조로 많은 연구가 진행되고 있으며 기생 캐패시턴스 및 게이트 전하 특성이 우수하다는 특징이 있어서 고전력 및 저전력 메모리 반도체에서도 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 온-저항을 줄이고 항복전압을 유지하기 위해 분리된 게이트 구조를 갖는 IGBT를 제안하여 전기적인 특성을 분석한 후, 일반적인 필드 스톱 IGBT와 비교하여 그 우수함을 입증하고자 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.

2. 본 론

2.1 제안하는 소자의 구조 및 동작 원리

IGBT의 동작 원리는 MOSFET과 비슷하다. 하지만 IGBT의 경우 하단에 P형 기판으로 제작되기 때문에 MOSFET과는 다르게 전자와 정공이 동시에 흐르게 되는 2개의 캐리어 소자이다. IGBT는 스위칭 오프 시 소수 캐리

어의 축적시간 때문에 그러한 축적 현상이 없는 MOSFET 보다 느린 스위칭 속도를 가지고 있다. 동작 원리를 살펴보면, 입력부의 게이트에 문턱 전압 이상을 인가하면 P-base 에 채널이 형성하게 되며, 그 이후 콜렉터-이미터 전압을 인가하게 되면 P-base에 형성된 채널을 통해 전류가 흐르게 된다. 트렌치 게이트의 경우 기존의 플래너 게이트에서 온-저항을 줄이기 위해 게이트 하단의 JFET 영역을 제거하는 트렌치 게이트 구조가 제안되었으며, 트렌치 게이트 구조로 발전되면서 플래너 게이트 구조보다 온-저항이 낮은 특징을 가지고 있다. 그림 1은 본 논문에서 제시하는 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT 구조와 일반적인 필드 스톱 트렌치 게이트 IGBT 구조의 단면도이다. IGBT 구조 중 필드 스톱 구조로 선택한 이유는 다른 종류인 PT (punch through), NPT (non punch through) 구조보다 소자의 크기는 작고 항복전압과 온-저항 특성이 우수하기 때문에 필드 스톱 구조로 실험을 진행하였고 실험 후 전기적 특성을 비교 분석하였다. 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT의 동작 원리는 일반적인 IGBT와 동일하다. 하지만 게이트 하단의 N-type poly Si 더미 게이트를 형성하면서 온-저항 특성이 일반적인 IGBT보다 더 향상된 특성을 얻을 수 있다. 또한 게이트 하단에 분리된 구조의 게이트를 형성하기 위해 일반적인 트렌치 게이트보다 깊은 트렌치 깊이로 설정하여 분리된 게이트를 설정하고자 하였다. 본 논문에서는 분리된 구조의 게이트 구조를 스플릿 게이트라는 파라미터로 명칭하고자 하며, 스플릿 게이트의 길이와 너비를 변화시키면서 실험을 진행하고자 하였다.

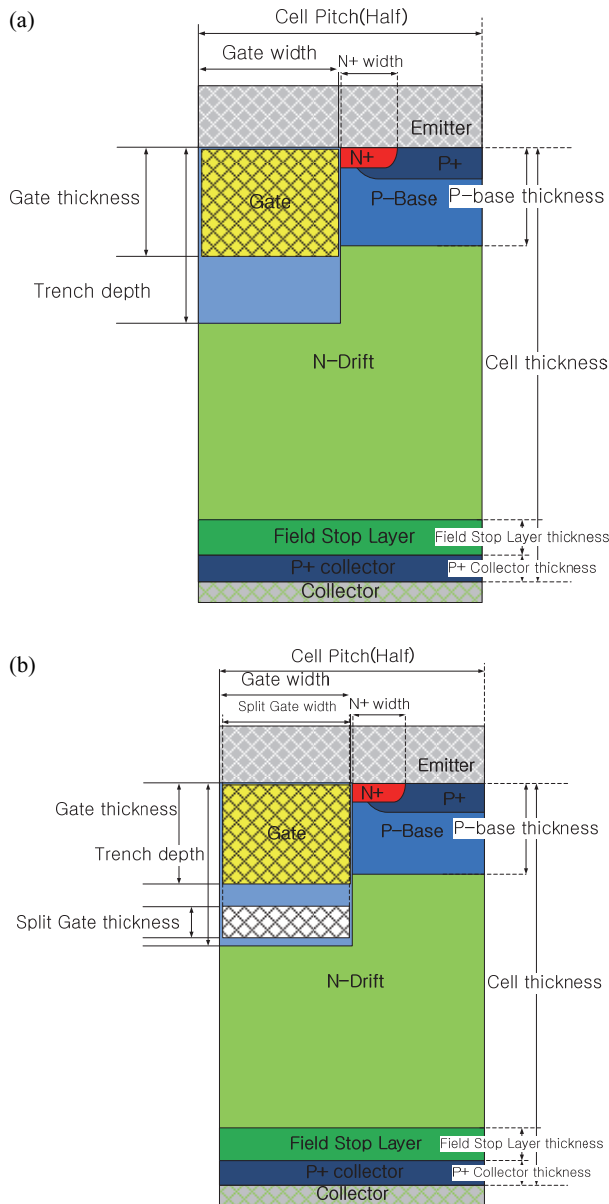


Fig. 1. The Structures of power IGBT of (a) field stop trench gate IGBT and (b) trench gate field stop IGBT with separated gate.

2.2 실험을 위한 설계 및 공정 파라미터의 설정

실험을 진행하기 위해 1,200 V급 필드 스톱 IGBT 및 분리된 구조의 게이트를 갖는 필드 스톱 IGBT의 기본적인 공정 및 설계 파라미터를 표 1에 제시하였다.

표 1의 파라미터를 바탕으로 기본적인 소자의 구조를 설계하였고 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT의 변화를 보기 위해 트렌치의 깊이 변수 실험과 스플릿 게이트 너비변수 실험을 진행하였다. 트렌치 깊이를 변화시키는 실험은 게이트의 크기는 고정하고 스플릿 게이트의 크기의 변화를 주어 항복전압과 온-상태 전압 강하를 확인하였다. 스플릿 게이트 너비에 대한 변수 실험은 트렌치 깊이를 고정하고 스플릿 게이트의 너비를 0.05 μm 부터 1.55 μm 까지 0.05 μm 씩 변화를 주면서 실험을 진행하였으며, 항복전압과 온-상태 전압 강하와 같은 전기적 특성을 분석하였다.

Table 1. Process and design parameters of 1,200 V class split gate field stop IGBT.

Process and design parameters	Unit	Value
Cell pitch (half)	μm	4.5
Cell thickness	μm	150
Epi thickness	μm	120
Wafer resistivity	Ω/cm^2	100
Gate width	μm	1.8
Gate thickness	μm	2.4
N+ width	μm	0.8
P-base dose	cm^2	5×10^{13}
Field stop layer thickness	μm	0.5
Trench depth	μm	6.0
Split gate thickness	μm	3.39
Split gate width	μm	0.05

3. 결과 및 고찰

3.1 Trench depth 실험에 따른 항복전압과 온-상태 전압 강하 특성

그림 2는 트렌치 깊이 변화에 따른 항복전압 그래프와 온-상태 전압 강하 특성을 보여주고 있다. 또한 스플릿 게이트 너비를 $0.05 \mu\text{m}$ 로 고정하고 트렌치 깊이는 $3.5 \mu\text{m}$ 부터 시작하여 $15.5 \mu\text{m}$ 까지 $0.5 \mu\text{m}$ 씩 변화를 주면서 실험을 진행하였다. 실험을 진행한 결과 항복전압의 경우 $6 \mu\text{m}$ 까지는 증가하는 그래프를 보이다가 이후로는 점차 감소하는 그래프를 보여주고 있다. 온-상태 전압 강하의 경우 $6.5 \mu\text{m}$ 까지 증가하는 그래프를 보이다가 이후로는 감소했다가 증가하는 그래프를 보여주고 있다. 이는 트렌치 깊이가 길어질수록 드리프트층의 면적이 줄어들기 때문에 감소하는 것이 맞지만 스플릿 게이트와 메인 게이트 사이에 SiO_2 가 채워져 있기 때문에 항복전압이 유지되는 되지만 온-상태 전압 강하도 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 그 변화가 0.01 V 이기 때문에 변화하지 않는 것으로 분석하였다.

3.2 Split gate width 실험에 따른 항복전압과 온-상태 전압 강하 특성

그림 3은 스플릿 게이트 너비의 변화에 따른 항복전압과 온-상태 전압 강하 그래프이다. 트렌치 깊이는 $6 \mu\text{m}$ 로 고정하고 스플릿 게이트 너비를 $0.05 \mu\text{m}$ 부터 $1.55 \mu\text{m}$ 까지

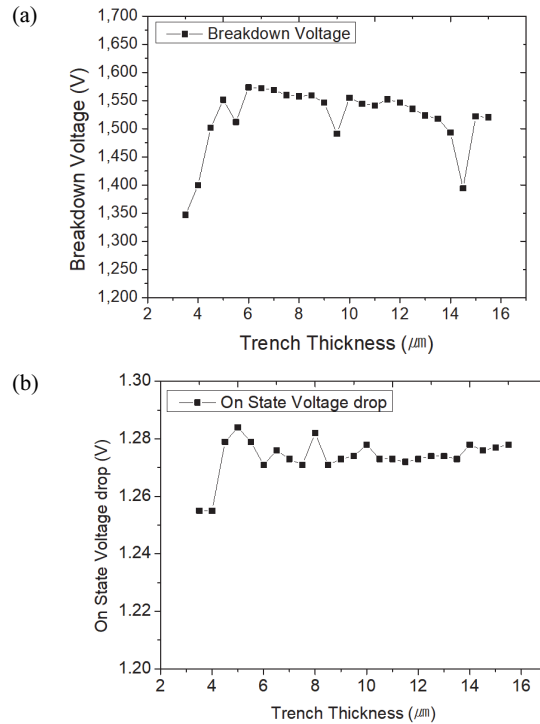


Fig. 2. Graph according to trench thickness change (a) breakdown voltage graph according to trench thickness change and (b) on-state voltage drop graph according to trench thickness change.

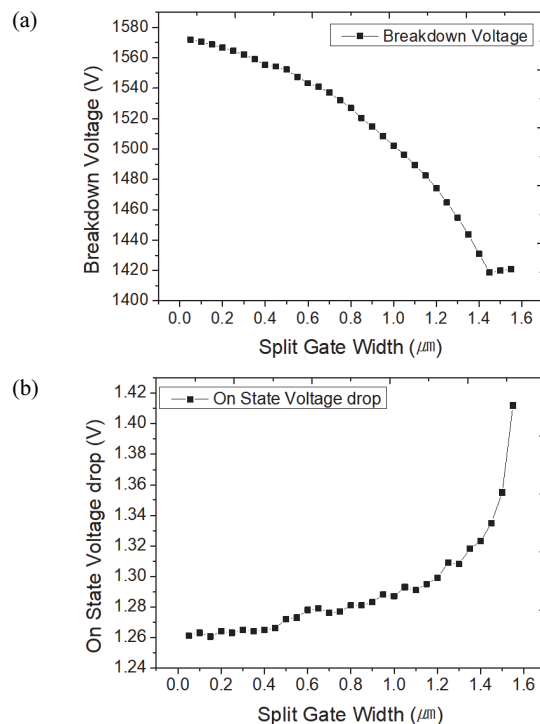


Fig. 3. Graph according to split gate width change (a) breakdown voltage graph according to split gate width change and (b) on-state voltage drop graph according to split gate width change.

0.05 μm 씩 변화를 주면서 실험을 진행하였다. 실험 결과 항복전압과 온-상태 전압 강하 모두 0.05 μm 가 가장 좋은 특성을 나타내고 있다. 0.05 μm 그 이후로는 항복전압은 감소하는 그래프를 보여주고 있고 온-상태 전압 강하의 경우 증가하는 그래프를 보여주고 있다. 항복전압의 경우 스플릿 게이트 너비가 증가하면서 SiO_2 의 크기가 감소하게 된다. 항복전압은 스플릿 게이트의 너비가 증가하면서 항복 메커니즘이 펀치스루의 지배를 받는 것이 아니고, 눈상태 항복이 지배적인 것으로 판단되지만, 1,200 V를 유지하기 위해서는 문제가 없는 것으로 판단된다. 다만 에너지 효율에 큰 영향을 주는 온-상태 전압 강하의 최적 파라미터를 유지하기 위해서는 0.05 μm 가 최적이라고 분석하였다.

3.3 일반적인 필드 스톱 구조와 split gate 구조 특성 비교

그림 4는 일반적인 필드 스톱 IGBT와 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT를 비교한 항복전압 그래프이다. 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT와 일반적인 필드 스톱 구조와 항복전압은 약 100 V 차이가 나는 것을 확인하였다. 이는 트렌치 깊이가 증가할수록 항복전압이 감소하게 되는데 분리된 게이트 구조에 존재하는 SiO_2 의 유무로 인해 항복전압이 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5는 일반적인 필드 스톱 구조와 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT의 온-상태 전압 강하를 비교한 그래프이다. 그림 5를 보면 일반적인 필드 스톱 구조가 분리된 게이트 구조를 갖는 구조보다 온-상태 전압 강하가 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 즉 항복전압 측면에서 우수한 특성을 가지면서 온-상태 전압 강하는 변하지 않는다는 것을 확인하였다.

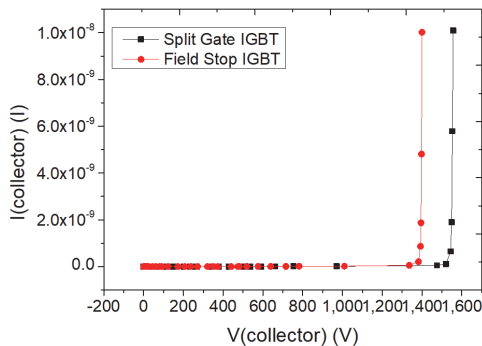


Fig. 4. Comparison of typical field stop IGBT and split gate field stop IGBT breakdown voltage.

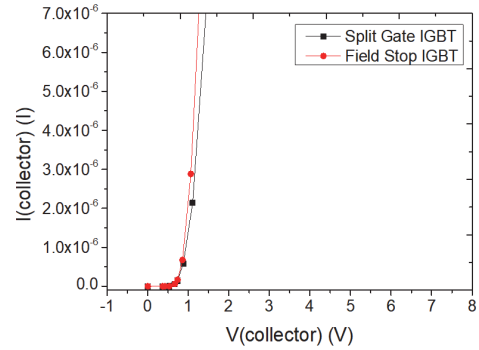


Fig. 5. Comparison of typical field stop IGBT and split gate field stop IGBT on-state voltage drop.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 및 에너지 신산업 분야에 활용되고 있는 1,200 V급 Si 기반 IGBT를 설계하였고 제안하는 구조인 분리된 게이트 구조를 갖는 필드 스톱 IGBT를 설계하여 트렌치 깊이 및 스플릿 게이트 너비 변수를 변화시키면서 실험을 진행한 후에 일반적인 트렌치 구조와 전기적 특성을 비교 분석하였다. 트렌치 깊이 실험을 진행한 결과 6 μm 일 때 항복전압이 가장 높게 측정되는 것을 확인하였고 온-상태 전압 강하의 경우 3.5 μm 일 때 가장 낮은 것을 확인하였다. 스플릿 게이트 너비 실험의 경우 변수를 증가시킬수록 항복전압이 감소하는 것을 확인하였고 온-상태 전압 강하는 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 스플릿 게이트의 너비는 변화시키지 않는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 또한 실험 결과, 일반적인 필드 스톱 구조가 분리된 게이트 구조를 갖는 구조보다 온-상태 전압 강하가 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 즉 항복전압 측면에서 우수한 특성을 가지면서 온-상태 전압 강하는 변하지 않는다는 것을 확인함과 동시에 분리된 게이트 구조를 갖는 더미(dummy) 게이트를 액티브 셀에 추가하면 온-상태 전압 강하 특성을 확연하게 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

ORCID

Ey Goo Kang

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

감사의 글

본 논문은 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재양성사업(P0017308)과 소재부품기술사업(20022501)의 지원에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- [1] H. Xu, Y. Yang, J. Tan, H. Zhu, Q. Q. Sun, and D. W. Zhang, *IEEE Trans. Electron Devices*, **69**, 5450 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3200645>
- [2] Y. He, H. Luo, R. Qin, X. Luo, Y. Yao, G. Wen, Q. Xiao, and C. Tan, *J. Comput. Electron.*, **20**, 568 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10825-020-01624-0>
- [3] K. Ohi, Y. Ikura, A. Yoshimoto, K. Sugimura, Y. Onozawa, H. Takahashi, and M. Otsuki, *Proc. 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)* (IEEE, Hong Kong, China, 2015) p. 25.
doi: <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2015.7123380>
- [4] D. Cho and K. Kim, *Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **16**, 283 (2012).
doi: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2012.16.4.283>
- [5] Y. C. Lee and J. L. Lin. *Solid State Electron. Lett.*, **2**, 23 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssel.2020.01.004>
- [6] C. H. Jo, D. H. Kim, B. S. Ahn, and E. G. Kang, *Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **25**, 350 (2021).
doi: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2021.25.2.350>
- [7] T. Laska, M. Munzer, F. Pfirsch, C. Schaeffer, and T. Schmidt, *Proc. 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Proceedings (Cat. No.00CH37094)* (IEEE, Toulouse, France, 2000) p. 355.
doi: <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2000.856842>
- [8] I. Deviny, H. Luo, Q. Xiao, Y. Yao, C. Zhu, L. K. Ngwendson, H. Xiao, X. Dai, and G. Liu, *Proc. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD)* (IEEE, Sapporo, Japan, 2017) p. 147.
doi: <https://doi.org/10.23919/ISPSD.2017.7988932>
- [9] F. T. Chien, Z. Z. Wang, C. L. Lin, T. K. Kang, C. W. Chen, and H. C. Chiu, *Micromachines*, **11**, 504 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi11050504>