

대용량 전력변환용 초접합 IGBT 개발에 관한 연구

정헌석, 강이구^a

극동대학교 태양광공학과

The Develop of Super Junction IGBT for Using Super High Voltage

Hun-Suk Chung and Ey Goo Kang^a

Department of Photovoltaic Engineering, Far East University, Eumseong 369-700, Korea

(Received July 19, 2015; Accepted July 24, 2015)

Abstract: This paper was proposed the theoretical research and optimal design 3000V super junction NPT IGBT for using electrical automotive and power conversion. Because super junction IGBT was showed ultra low on resistance, it was structure that can improve the thermal characteristics of conventional NPT IGBT. The electrical characteristics of super junction NPT IGBT were 2.52 V of on state voltage drop, 4.33 V of threshold voltage and 2,846 V breakdown voltage. We did not obtain 3,000 V breakdown voltage but we will obtain 3,000 V breakdown voltage through improving p pillar layer. If we are carried this research, This device will be used electrical automotive, power conversion and high speed train.

Keywords: Planar gate, Super high voltage, Super junction, NPT IGBT, Breakdown voltage

1. 서 론

IGBT (insulated gate bipolar transistor) 소자는 전류전도 능력이 뛰어난 소자이며, 큰 전력을 처리하기 위해 설계된 스위칭 디바이스로서 전원공급 장치, 변환기, 태양광인버터, 가전제품 등에 널리 사용되고 있다 [1,2]. 이러한 IGBT는 파워 반도체 소자인 만큼 항복 전압과 온-상태 전압 강하, 스위칭 속도, 신뢰성의 이상적인 파워 반도체 소자의 요구사항을 목표로 하고 있다. 일반적으로 드리프트 영역의 농도를 낮추게 되면 항복 전압은 증가하지만 온 저항과 같은 기타 특성들이 감소하게 되므로 설계의 최적화 및 구조 변경을 통해 항복전압 특성과 온 상태 전압강하 특성을 개선 시

켜야 한다. 이렇듯 IGBT 소자의 효율을 높이기 위해 트레이드 오프관계를 최적화 시키고자 여러 가지 구조들이 나오고 있다. IGBT는 보편적으로 600 V~1,700 V급을 사용하는 스위칭 산업분야 중 신재생에너지용 인버터 분야, SMPS, 전기자동차의 배터리 전원장치 등 다양한 산업에서 필수적인 부품으로 사용되고 있다 [3-5]. 또한 초고압 IGBT 분야에서는 송전 부분에서 전력변환 스위칭 및 고속전철 전동장치 등에서 활용되고 있다.

본 논문에서는 초고압(3,000 V 이상)을 유지하면서 온 상태 전압강하를 낮출 수 있으며, 열적 특성이 우수한 대용량 초접합(super junction, SJ) IGBT 구조를 제안하였으며, 소자 및 공정 시뮬레이터를 이용하여 전기적인 특성을 분석하였다.

a. Corresponding author; keg@kdu.ac.kr

2. 실험 방법

2.1 초접합 NPT IGBT의 이론적 고찰

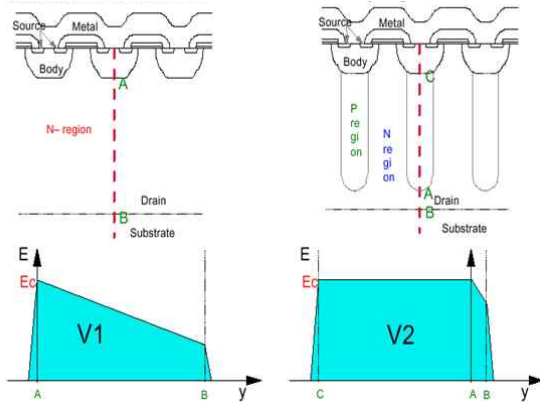


Fig. 1. The electrical field distribution of the conventional and super junction devices.

일반적인 NPT-IGBT의 경우 턴-오프 상태일 때 항복전압은 그림 8에서 순방향 전압 인가에 따라 P-베이스와 N-드리프트간의 역방향 접합으로 인해 확장된 공핍층으로 결정되고 이때 N-드리프트의 농도로 결정된 전계값의 길이에 대한 적분값이 항복전압이 된다.

이 경우 최대 전계점은 P-베이스와 N-드리프트 간의 접합 부분에서 형성되고 NPT IGBT의 이상적인 경우 드리프트 영역에서 일정한 기울기를 갖는 삼각형 형태로 전계가 형성되며, 따라서 항복전압을 늘리기 위해 N-드리프트 영역의 도핑농도를 작게 하고, 길이를 길게하여 최대 전계값이 일정한 조건에서 길이에 비례하여 항복전압을 증가시키게 된다. 그러나 드리프트 영역의 길이가 증가하면 전계 저항 성분 중 드리프트 저항성분이 증가하게 되어 온 상태 전압 강하가 커지는 트레이드 오프관계가 발생한다.

전력 반도체에서 이와 같은 항복전압, 온 상태 저항 간의 트레이드 오프를 개선하는 방법으로 초접합 구조가 개발되었으며, 초접합 구조는 트렌치 공정을 이용하여 P-베이스 영역 아래에 P pillar를 삽입한 구조이며 공핍층을 수직방향으로 뿐만 아니라 수평방향으로도 확장시켜서 온 상태 저항 특성 저하 없이 항복전압 특성을 혁신적으로 개선한 구조이다. P pillar 구조를 형성하기 위해 N-드리프트 층의 에칭공정 혹은 멀티 에피택셜 성장 공정이 추가로 요구된다.

그림 1에서 A-B Y축 방향으로의 2차원 형태로 전계 분포를 볼 때에 P-pillar 영역으로 인해 최대 전계 E_c 의 위치가 P-베이스 영역뿐 아니라 P-pillar 영역에서 동일하게 존재하게 된다. 따라서 동일한 드리프트

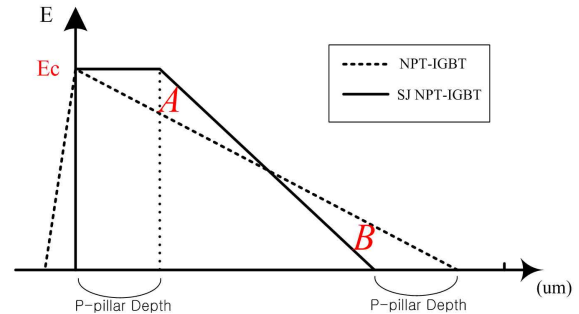


Fig. 2. The electrical field distribution of the conventional NPT IGBT and super junction NPT IGBT.

길이일 때 항복전압을 획기적으로 증가시킬 수 있다. 이 때 항복전압은 전계분포의 적분형태로 다음 수식 (2-1)과 같다.

$$BV = E_c \times t_{pillar} \tag{2-1}$$

초접합은 이론적으로 P pillar의 전하량과 N-드리프트 영역의 전하량이 균형을 이룬 조건에서 Y축 전계가 최대 전계로 유지되어 최대 항복전압을 가진다. 즉, 이론적 모델로 전하 균형 상태를 고려할 때 P base와 JFET 영역의 도핑은 고려하지 않는 간략화 된 조건에서 N pillar와 P pillar 농도와 width가 동일한 값을 가질 때 전하 균형 상태가 되고 항복전압의 최대점이 얻어지게 된다.

그림 2에서 일반적인 NPT IGBT와 초접합 NPT IGBT의 수직방향 전계 분포를 나타내었다. 초접합 구조를 적용하고, 일반 NPT-IGBT와 같은 크기의 항복전압을 갖도록 설계하기 위해서는 그림 2에서 나타낸 것처럼 전계의 적분값이 같도록 설계해야 하고 따라서 A와 B의 면적이 같게 될 때 동일한 항복전압을 갖게 된다.

이 때 면적이 같게하는 초접합 IGBT의 드리프트 길이는 일반 NPT IGBT 드리프트 길이보다 그림 2에 나타낸 것과 같이 P pillar 길이만큼 짧게 설계할 수 있고, 결과적으로 N-드리프트 저항을 작게 설계하여 온 상태 전압 강하 특성을 개선할 수 있고 이에 따라 열 특성 또한 개선할 수 있다. 따라서 최적화된 플래너 게이트 NPT-IGBT의 온 상태 전압강하 특성과 열 특성을 개선하기 위해 초접합 구조를 적용한 초접합 IGBT를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 전기적인 특성을 분석하였다.

2.2 3,000 V 초접합 NPT IGBT 설계

기존의 NPT-IGBT의 구조에서 온 상태 전압강하는 더 이상 개선될 수 없지만 동일한 항복전압대비 온 상태 저항을 획기적으로 개선할 수 있는 초접합 구조를 이용함으로써 항복전압의 강하 없이 온 상태 저항을 감소시킬 수 있다. 초접합 MOSFET과 달리 N-drift 층의 길이가 매우 긴 NPT-IGBT에 초접합을 적용하기 위해 N-드리프트 영역 중 상단 약 60 μm 길이로 P-pillar를 형성하여 초접합 NPT IGBT 구조를 설계하였다.

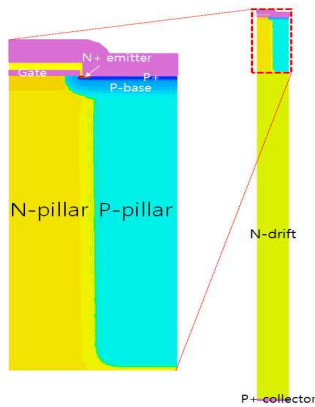


Fig. 3. The active cell of super junction NPT IGBT.

그림 3은 초접합 NPT IGBT의 구조를 보여주고 있다. 그리고 표 1에서는 해당 구조의 설계 파라미터를 나타내고 있다. 초접합을 적용하기 위해 NPT IGBT의 N-드리프트 영역 상단 중 P-pillar영역을 60 μm만큼 에칭한 뒤 P-pillar를 에피텍셀 성장시키고, 다시 8 μm 두께를 CMP 공정으로 제거한 뒤 게이트와 P-베이스 및 N+이미터 기존 공정 과정을 통해 52 μm 깊이의 N pillar와 P pillar를 형성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

이 때 동일한 항복전압을 갖는 SJ NPT IGBT를 설계하기 위해서는 그림 2의 NPT IGBT와 SJ NPT IGBT의 전계의 드리프트 길이에 대한 적분값이 같아야 하며, 해당 공핍층의 크기는 343 μm이며, 여유 길이 27 μm를 고려하여 N-드리프트 길이 설계 조건은 370 μm로 시뮬레이션을 진행하였다. 이러한 조건으로 설계하여 시뮬레이션을 진행한 결과 항복전압은 2,777 V로 온 상태 전압 강하는 2.47 V로 확인되었다.

Table 1. The design parameters of super junction NPT IGBT.

Classification	Size (μm)	Classification	Size (μm)
Cell Pitch	24	P+base Width	12.5
Gate Width	10	P+base Depth	0.6
P-base Width	14	JFET Depth	4
P-base Depth	2.4	P+ Collector Depth	0.5
N+ Emitter Width	1.5	N+ Emitter Depth	0.5
N-drift Length	370	N-pillar Resistivity	13
N/P-pillar Depth	52	P-pillar Resistivity	34.2

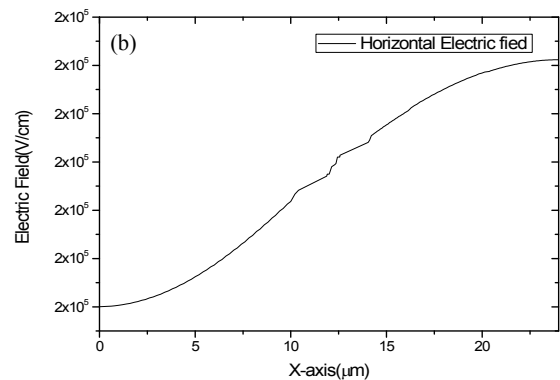
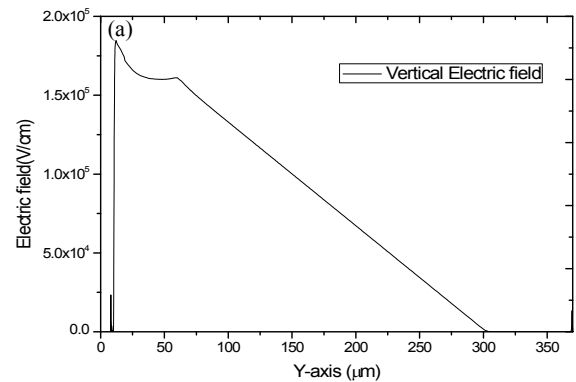


Fig. 4. The electric field distribution of SJ IGBT at 370 μm length of N drift depth. (a) Y axis and (b) X axis.

그림 4는 항복전압 인가 시점에서 소자의 수직 수평 방향 전계분포를 보여주고 있다. 수직방향 전계의 경우 60 μm 지점에서 전계보다 P-베이스의 전계가 높게 형성되어있는 것을 확인할 수 있다.

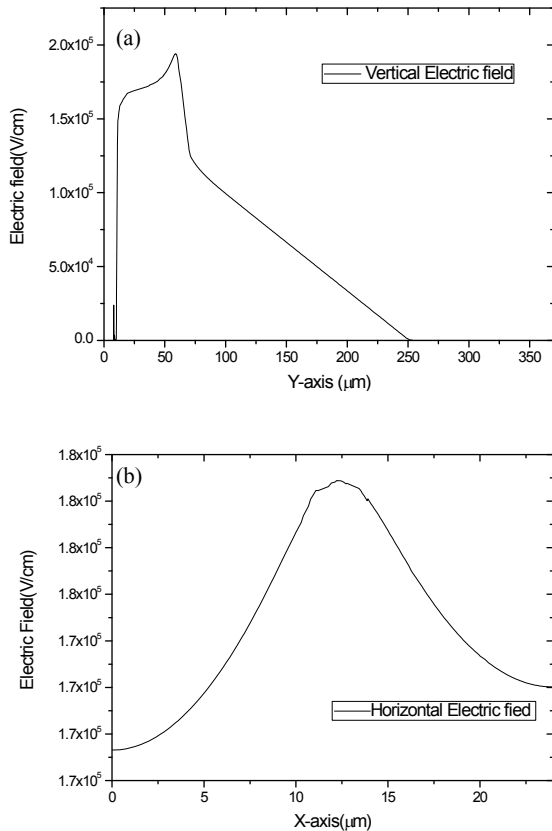


Fig. 5. The electric field distribution of SJ IGBT after formation epitaxial layer. (a) Y axis and (b) X axis.

전하 균형을 고려하여 P-pillar 농도를 $102.6 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 하고, N-pillar 농도를 $39 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 설계하여 시뮬레이션을 진행한 결과 그림 5에서 나타낸 것처럼 수평축 전계분포로부터 P-pillar와 N-pillar의 전하균형이 이루어진 것을 확인하였다. 그러나 항복전압이 2,012 V으로 3,000 V 설계 목표보다 매우 낮은 전압으로 확인된다. 그림 5의 수직 전계분포에서 P-pillar 하단 부분인 $60 \mu\text{m}$ 와 에피택셜층의 끝 부분인 $70 \mu\text{m}$ 사이에서 고농도 N-도핑영역으로 인해 전계가 급격하게 떨어져서 드리프트 영역에 충분히 공핍층이 형성되지 못하는 것을 알 수 있다. 이를 보완하기 위해 P-pillar 하단의 에피택셜층의 여유 길이를 최소로 하여 항복전압을 증가시킬 수 있었다.

다시 개선하여 시뮬레이션 한 결과 그림 6과 같이 전계의 분포가 변화하여 N-드리프트 영역으로의 공핍층이 확장되고 최종적으로 항복전압이 2,830 V까지 증가한 것을 확인하였다.

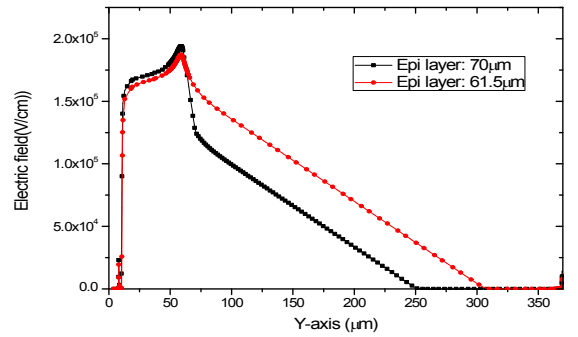


Fig. 6. The vertical electric field distribution of SJ IGBT at $70 \mu\text{m}$ and $61.5 \mu\text{m}$ length of epitaxial layer.

3. 결과 및 고찰

Table 2. The electrical characteristics of SJ NPT IGBT.

Classification	Value
Threshold Voltage(V)	4.33
On state Voltage Drop(V)	2.52
Breakdown Voltage(V)	2846

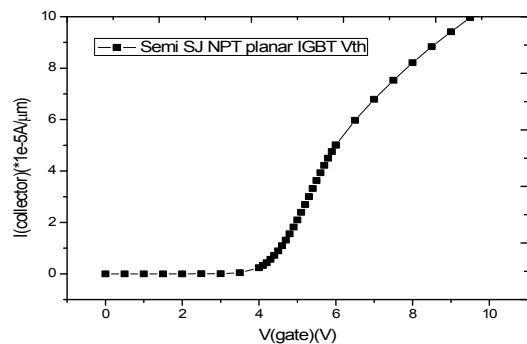


Fig. 7. The threshold voltage characteristics of SJ NPT IGBT.

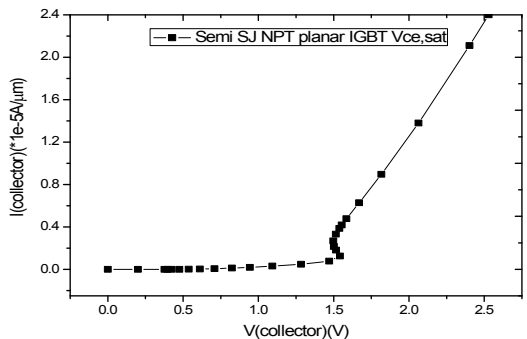


Fig. 8. The on state voltage characteristics of SJ NPT IGBT.

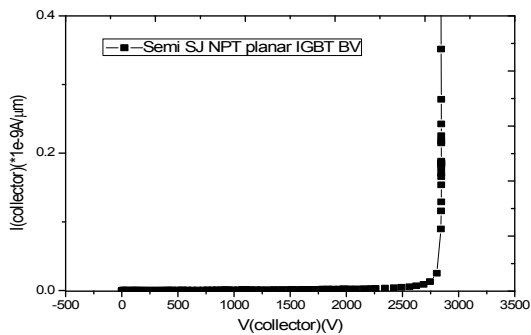


Fig. 9. The breakdown voltage characteristics of SJ NPT IGBT.

플래너 게이트 NPT-IGBT에 초접합을 적용하여 설계한 문턱전압, 온 상태 전압 강하 및 항복전압의 그래프는 각각 그림 7, 8, 9와 같고 이를 정리한 소자의 전기적 특성 값은 표 2에서 보여주는 바와 같다.

4. 결론

본 논문에서는 대용량 전력산업에 스위치로 사용되는 3,000 V급 초접합 NPT IGBT 소자를 제안하였으며, 소자 및 공정 시뮬레이터를 이용하여 최적의 설계 방안을 제시하였다. 초접합 구조는 일반적인 구조에 비해 현저히 낮은 온 저항을 갖기 때문에 대용량에서 발

생할 수 있는 낮은 열 특성을 충분히 보완할 수 있는 구조이다.

본 연구에서 제시한 SJ NPT IGBT는 항복전압은 2,846 V, 온 전압 강하는 2.52 V, 문턱전압은 4.33 V의 특성을 나타내고 있다. 3,000 V의 항복전압을 달성하지 못했지만, pillar층의 개선으로 3,000 V 이상은 충분히 달성할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구가 지속적이고 성공적으로 수행된다면, 전기자동차 및 고속전철 등에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] MOSFET Basics - Fairchild Semiconductor, 2000
- [2] G. P. Sim, B. S. Ann, Y. H. Kang, Y. S. Hong, and E. G. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 190 (2013).
- [3] H. S. Lee, E. G. Kang, A. Shin, H. H. Shin, and M. Y. Sung, *KIEE*, **7** (2006).
- [4] Y. S. Hang, E. S. Jung, and E. Y. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 276 (2012).
- [5] J. H. Lee, E. S. Jung, and E. Y. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 270 (2012).