

SiO₂/P+ 컬렉터 구조를 가지는 1700 V급 고전압용 IGBT의 설계 및 해석에 관한 연구

Design and Analysis of Insulator Gate Bipolar Transistor (IGBT) with SiO₂/P+ Collector Structure Applicable to 1700 V High Voltage

이한신¹, 김요한¹, 강이구², 성만영^{1,a}

(Han Sin Lee¹, Yo Han Kim¹, Ey Goo Kang², and Man Young Sung^{1,a})

Abstract

In this paper, we propose a new structure that improves the on-state voltage drop and switching speed in Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBTs), which can be widely used in high voltage semiconductors. The proposed structure is unique in that the collector area is divided by SiO₂, whereas the conventional IGBT has a planar P+ collector structure. The process and device simulation results show remarkably improved on-state and switching characteristics. Also, the current and electric field distribution indicate that the segmented collector structure has increased electric field near the SiO₂ corner, which leads to an increase of electron current. This results in a decrease of on-state resistance and voltage drop to 30 % ~ 40 %. Also, since the area of the P+ region is decreased compared to existing structures, the hole injection decreases and leads to an increase of switching speed to 30 %. In spite of some complexity in process procedures, this structure can be manufactured with remarkably improved characteristics.

Key Words : IGBT, P+ collector, SiO₂, On state voltage, Switching time, Injection efficiency

1. 서론

Inverter와 motor drive 등과 같은 고전압용 반도체 소자로 널리 쓰이는 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)는[1] MOSFET type에 비해서 고전압에 대한 blocking 특성 및 온 상태에서의 전압 강하 특성이 우수하지만 turn-off 시의 스위칭 특성이 열악한 단점이 있다[1]. 또한 온 상태에서의 전압 강하 특성과 turn-off 특성은 서로 trade off 관계가 있어 동시에 두 가지 특성을 개선하는 것은 어려운 과제 중 하나였다. 이와 같은 IGBT의

취약점을 개선하기 위해서 몇몇 연구그룹들은 Field Stop[2]이나 Super Junction[3], Striped Anode[4] 등의 구조를 제안하여 낮은 온 상태 전압 강하와 좋은 turn-off 특성을 갖는 IGBT에 대한 연구를 수행해왔다. 이중 Striped Anode의 경우 P+ 컬렉터 영역을 기존의 고동도 일체형에서 고동도와 저농도의 샌드위치 구조로 실현하여 홀의 주입량을 줄이고자 하였는데 이 같은 경우 스위칭 특성은 향상되나 홀의 감소로 인해 온 저항은 증가하는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이의 원리를 적용하여 P+ 면적을 감소해 스위칭 특성은 향상하면서 온 저항은 감소시킨 새로운 컬렉터 구조를 제안하였다. 즉 컬렉터 영역에 부분적으로 trench SiO₂를 형성시킨 SiO₂/P+ 컬렉터 구조를 제안하여, 스위칭 특성과 온 상태 특성을 모두 향상시킨 High Density Electron IGBT (HDE-IGBT)를 제안하였으며 이의 전기적인 특성을 simulation 하여 분석하였고 이에 대한 model을 제시하였다.

1. 고려대학교 전기전자공학과

(서울시 성북구 안암동 5가 1)

2. 극동대학교 컴퓨터정보표준학부

a. Corresponding Author : semicad@korea.ac.kr

접수일자 : 2006. 8. 10

1차 심사 : 2006. 9. 15

심사완료 : 2006. 9. 19

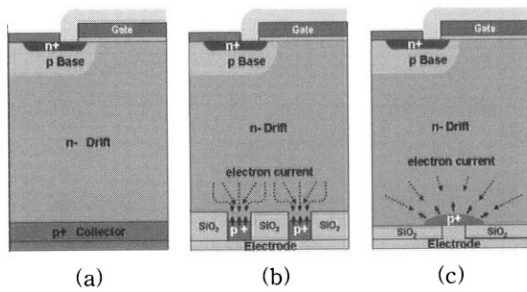


그림 1. 제안된 SiO₂/P⁺ 컬렉터 구조의 수직단면도.
 (a) 일반적인 구조의 IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B
Fig. 1. Vertical view of SiO₂/P⁺ collector structure. (a) Conventional IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B

2. SiO₂/P⁺ 컬렉터 IGBT의 개념

본 논문에서 제안한 HDE-IGBT의 구조를 그림 1에 나타내었다. (a), (b), (c)는 각각 일반적인 IGBT와 제안한 두가지 형태의 HDE-IGBT를 나타내었는데 type A의 경우 SiO₂내에 P⁺ 영역이 분할되어 형성된 구조이고 type B의 경우 SiO₂ 영역 외부에 P⁺ 영역이 원형 구조로 형성된 구조를 제안하였다. 제안한 구조의 경우 일반적인 IGBT와 비교했을 때 P⁺ 영역이 웨이퍼 밑부분 전체에 균일하게 형성되어 있는 것이 아니라 SiO₂로 분할되어 부분적으로만 N- drift region과 접해있다.

기본적으로, HDE-IGBT는 N- drift영역에 대해서 P⁺ 면적 비중을 감소함으로써 소수 캐리어인 홀의 주입효율을 최적화 시키고, 반대로 전자 전류는 집중 시켜 온 저항은 감소시키고자 의도한 구조이다. HDE-IGBT가 동작을 할 때 일반적인 IGBT와 마찬가지로 P⁺ 영역에서 고농도의 홀이 주입된다. 그러나 HDE-IGBT에서의 홀 농도는 기존의 구조에 비해 전체적인 P⁺ 면적이 작아 그만큼 감소하게 된다. IGBT의 스위칭 특성은 소수 캐리어인 홀 농도에 반비례하여 향상되므로 홀 농도의 감소는 turn off time을 감소하는 역할을 하게 된다. 또한 전자 전류 면에서 보면 기존의 IGBT에는 없는 전계 집중 영역이 type A의 경우 SiO₂ corner 부위에, type B의 경우 실린더형 P⁺ junction에 발생하므로 전자 전류가 증가하게 된다. 이로 인해 HDE-IGBT는 홀 전류보다 전자전류에 의한 전류흐름이 더 우세할 수 있게 되어 순방향

표 1. Simulation시 사용한 IGBT의 doping 농도.
Table 1. Doping concentration of simulated IGBT.

	Emitter (N ⁺)	Latch-up 방지 layer(P ⁺)	Base (P)	Drift (N ⁻)	컬렉터 (P)
농도 (cm ⁻³)	2E19	1E19	1E17	5.5E13	5E17

특성과 함께 turn-off 특성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기존의 일반적인 수직형 IGBT 구조 및 제안한 HDE-IGBT에 대해 공정 및 소자 simulation을 실시하여 이에 대한 전기적 특성을 평가하였다. 본 연구에서 적용한 소자는 1700 V 용 고전압 IGBT였으며 이때 사용된 불순물 doping은 표 1에 나타내었는데, 세가지 구조 모두 동일한 조건으로 적용하였고, 새로운 구조에서는 컬렉터 영역비 (W)를 변화 하면서 주입 효율에 대한 특성을 평가하고자 하였다.

3. 전기적 특성 결과

TSUPREM4와 MEDICI simulator를 사용하여 일반적인 수직형 구조를 가지는 IGBT와 HDE-IGBT의 전기적인 특성을 비교 분석하였다.

그림 2는 일반적인 IGBT와 HDE-IGBT의 온 상태에서 전류-전압 특성 curve를 나타내었다.

이때 적용된 컬렉터 치수는 Type A의 W가 0.5 μm, L이 0.5 μm 였고 type B가 각각 2.5 μm, 1 μm 였다. 전류가 100 A/cm² 일때의 전압을 온 상태에서의 전압 강하라고 했을 때 일반적인 IGBT의 온 저항 전압 강하는(V_{cesat}) 3.1 V인 반면 HDE-IGBT type A와 type B는 각각 2.51 V와 2.58 V로 모두 온 상태 성능이 개선됨을 확인 할 수 있었다.

IGBT는 고전압용 소자이므로 고전압에서의 전압 저지 능력이 중요하다. 그림 3은 각 구조에서 항복 전압을 평가하기 위해 off 상태에서의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 항복 전압은 온 저항 감소에 의한 효과로 type A의 경우 약 20 V, type B의 경우 약 10 V 정도 저하 되는 것을 관찰 할 수 있다. 그러나 적용 전압인 1700 V는 모두 상회하는 값이며 저하 정도 또한 10~20 V로 극히 미미하여 특성에 미치는 영향은 무시할 정도의 수준으로 파악되었다.

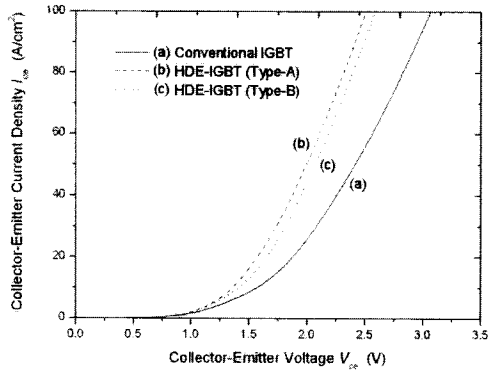


그림 2. 컬렉터 구조에 따른 온 상태 전류-전압 특성.

Fig. 2. Current voltage characteristics with different collector structure at on state.

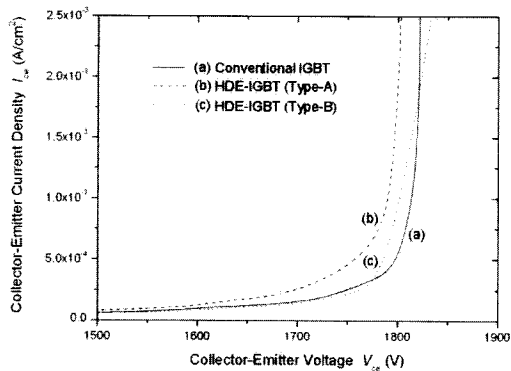


그림 3. 컬렉터 구조에 따른 항복 전압 특성.

Fig. 3. The breakdown voltage characteristics with different collector structure at off state.

HDE-IGBT의 가장 큰 장점은 온 상태 특성과 turn-off 스위칭 특성을 동시에 개선시킨다는 점이다. 그림 4는 기존 IGBT를 포함, 앞서 제시한 두 가지 구조에 대해 P+ 농도와 면적 (W)의 변화를 주어진 온 저항 전압 강하 (V_{cesat} @ $I_{ce}=100 \text{ A/cm}^2$) 특성과 turn-off time(T_f)에 관한 특성 curve를 나타내었다. 온 상태 특성과 스위칭 특성의 trade-off curve로 잘 알려져 있는 이 그림에서, HDE-IGBT가 기존의 IGBT에 비해 뛰어난 특성을 보여 주고 있다. 즉, 같은 V_{cesat} 조건에서는 낮은 T_f 특성의 획득이 가능했고 같은 T_f 조건에서는 더 낮은 V_{cesat} 특성을 나타내었다.

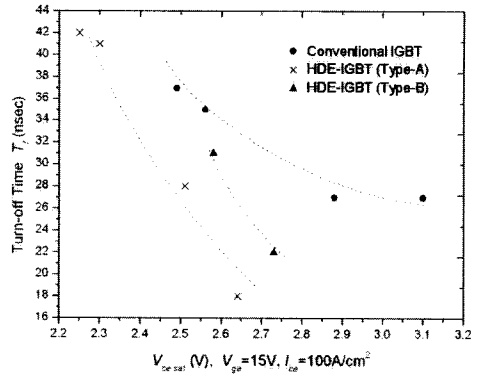


그림 4. 컬렉터 구조에 따른 온 저항 전압강하 대 Turn-off time 특성 curve.

Fig. 4. The turn-off time as a function of on state voltage drop with different collector structure.

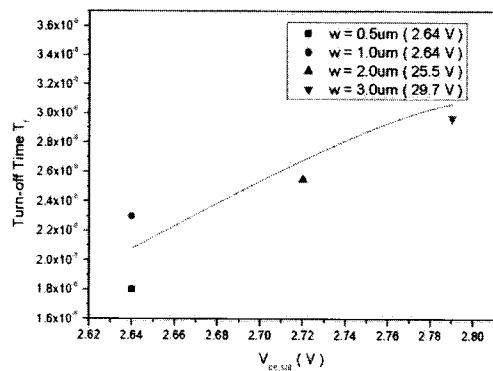


그림 5. HDE-IGBT Type A에서의 W에 따른 온 저항 전압강하 및 스위칭 속도 특성.

Fig. 5. The turn-off time as a function of on state voltage drop with different collector width at HDE-IGBT type A.

그림 5에는 Type A 구조에서 홀 주입 면적에 따른 온 저항 전압강하 대 Turn-off time 특성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 P+ 면적을 줄일수록 T_f 의 감소와 함께 V_{cesat} 도 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 W가 감소함에 따라 주입되는 홀의 농도는 감소하면서도 주입구 부분에서의 SiO₂ corner 부분이 인접함에 따라 전계가 서로 중첩되어 강해지는 효과로 전자 전류가 더욱 증가하는 것에 기인하는 것으로 사료 된다.

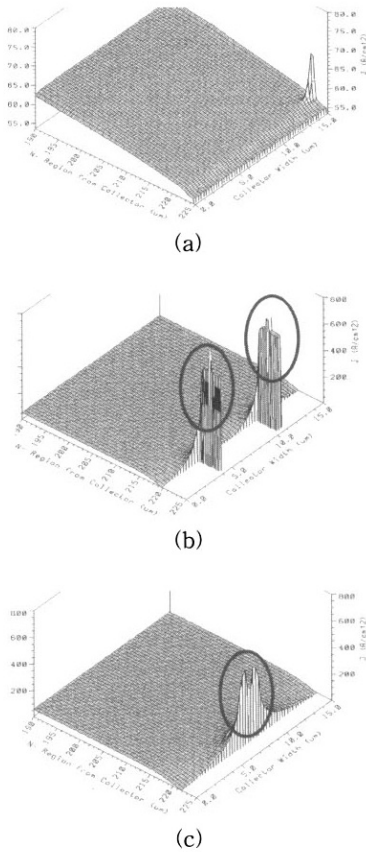


그림 6. 3차원 전자 전류 밀도 분포도. (a) 기존 IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B

Fig. 6. 3-dimensional electron current density with different collector structure. (a) Conventional IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B

4. 특성 해석

HDE-IGBT에서 온 전압강하 특성 및 스위칭 속도 특성이 동시에 개선되는 원인을 분석하기 위해 컬렉터 쪽의 전류분포에 대한 분석을 진행하였다. 그림 6은 일반적인 IGBT와 HDE-IGBT type A 그리고 HDE-IGBT type B에 대한 전자 전류 밀도를 3차원으로 나타내었다. X축은 컬렉터의 길이 방향, Y축은 gate로부터의 거리이고 Z축은 각 지점에서의 전자전류밀도의 크기이다. 그림에서 보는 바와 같이 HDE-IGBT의 경우 분할된 컬렉터 영역에서 전자 전류가 급속히 증가되는 것을 볼 수 있

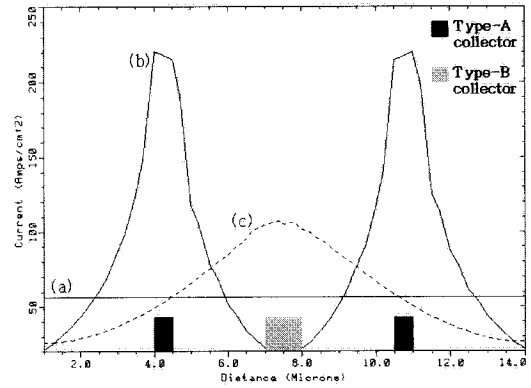


그림 7. 컬렉터 인근 영역에서 컬렉터 길이 방향에 따른 전자 전류 밀도 분포도. (a) 기존의 IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B

Fig. 7. Electron current density near the collector area. (a) Conventional IGBT (b) HDE-IGBT Type A (c) HDE-IGBT Type B

다. 또한 그림 7은 컬렉터에 근접한 drift region에서 X축에 따른 전자전류밀도를 나타내었다. 일반적인 IGBT는 약 57 A/cm^2 로 전류의 분포가 위치에 따라 일정한 반면 HDE-IGBT Type A와 Type B는 P+ 영역 부근에서 최고 220 A/cm^2 , 105 A/cm^2 에 달하는 급격한 전자전류의 증가를 보이고 있다.

살펴본 바와 같이 두 HDE-IGBT의 경우 P+ 영역부근에서 기존의 IGBT와는 비교할 수 없을 만큼의 전자전류가 유도됨을 알 수 있었다. 따라서 축소된 P+ 영역에 의한 홀 전류의 감소와 분할된 P+ 영역 부근에서의 증가된 전자 전류에 의해 온저항의 감소 및 스위칭 특성의 개선이 나타난다.

전자 전류의 급속한 증가를 발생시키는 원인분석을 위해 그림 8과 같이 전계 분포를 평가하였다. P+ 영역 부근에서의 전계가 SiO₂의 corner 부위 (Type A) 내지 P+ junction edge (Type B)에서 상승하고 이로 인해 전자 전류가 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 즉 SiO₂와 P+로 분할된 구조에서 온 전압강하 감소의 원인인 전자 전류의 증가는 corner 및 P+ edge에서의 전계 상승에 기인하는 것으로 해석 가능하다. 물론 이때 홀 전류도 증가할 수 있으나 N- Drift region에 노출된 면적이 적기 때문에 전체적인 홀의 주입량은 감소 될 수 있

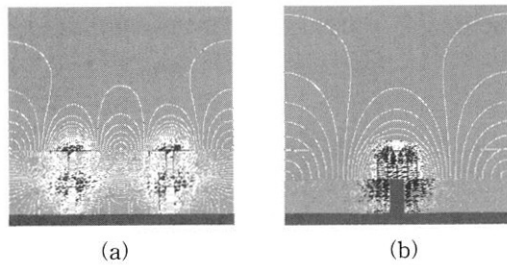


그림 8. HDE-IGBT에서 컬렉터 영역 부근의 전계 분포도. (a) HDE IGBT Type A (b) HDE IGBT Type B

Fig. 8. Electric field contour near the collector area. (a) HDE IGBT Type A (b) HDE IGBT Type B

다. 위의 관계를 이용하여 홀의 주입 효율과 전자 전류의 비를 최적화 하면 온 상태 특성과 스위칭 속도 특성의 동시 개선이 가능하다.

5. 결론

새로운 구조의 SiO₂/P⁺ 컬렉터 IGBT를 설계하여 이의 특성을 simulation을 통해 분석 평가하였다. 새로운 구조의 가장 큰 특징은 컬렉터 SiO₂ 부근에서 전계가 집중하여 이부분의 전자 농도가 증가하는 것인데 (High Density Electron IGBT : HDE-IGBT) 그 동안의 연구에서 동시에 개선하기가 어려웠던 스위칭 속도와 온 저항 전압 강하 특성을 동시에 개선 가능하였다. 즉 새로운 구조를 적용한 경우 P⁺ 영역의 감소로 인한 홀 주입 감소로 스위칭 속도가 30 % 이상 감소하였으며 P⁺ 영역 감소에 따라 이 효과는 더욱 증대 되었다. 또한 온 상태에서의 전압 강하도 기존 구조 대비 약 30~40 % 정도 감소되는 특성을 확보 하였는데 이는 SiO₂ corner 부위의 전계가 상승하여 이 영역을

지나는 전자 농도가 급격히 증가하는 것이 기인하였다. 본 연구에서 제안한 구조를 실 제품에 적용할 경우 약간의 공정상 복잡성을 야기할 수 있으나 이를 상쇄할 만한 양호한 특성을 확보할 수 있어 향후 많은 적용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2006 년도 산업자원부 전력 IT 사업 중 “분산 발전 및 산업용 인버터 응용을 위한 전력 반도체 기술 개발”의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Devices", PWS, 1996.
- [2] T. Laska, M. Münzer, F. Pfirsch, C. Schaeffer, and J. Schmidt, "The field stop IGBT (FS IGBT) - a new power device concept with a great improvement potential", Proc. 12th ISPSD, p. 335, 2000.
- [3] F. D. Bauer, "The super junction bipolar transistor: a new silicon power device concept for ultra low loss switching applications at medium to high voltages", Solid-State Electronics, Vol. 48, No. 5, p. 705, 2004.
- [4] N. Luther-King, M. Sweet, O. Spulber, K. Vershinin, M. M. De Souza, and E. M. Sankara Narayanan, "Striped anode engineering: a concept for fast switching power device", Solid-State Electronics, Vol. 46, Iss. 6, p. 903, 2002.