

트렌치 콜렉터를 가지는 새로운 TIGBT 에 관한 연구

A Study on the Novel TIGBT with Trench Collector

이재인¹, 양성민¹, 배영석¹, 성만영^{1,a}

(Jae In Lee¹, Sung Min Yang¹, Young-seok Bae¹, and Man Young Sung^{1,a})

Abstract

Various power semiconductor devices have been developed and evolved since 1950s. Among them, IGBT is the most developed power semiconductor device which has high breakdown voltage, high current conduction and suitable switching speed which perform trade-offs between each other. In other words, there are trade-offs between a breakdown voltage and on-state voltage drop, and between on-state voltage drop and turn-off time. In this paper, the new structure is proposed to improve a trade-off between a breakdown voltage and on-state voltage drop. The proposed structure has a trench collector and this trench collector induces an accumulation layer at the bottom of an n-drift region during off-state. And this accumulation layer prevents expansion of depletion layer so that trapezoidal electric field distribution is performed in the n-drift region. As a result of this, breakdown voltage is increased without increasing on-state voltage drop. The electrical characteristics of the proposed IGBT is analyzed and optimized by using representative device simulator, TSUPREM4 and MEDICI. After optimization, the electrical characteristics of the proposed IGBT is compared with NPT IGBT which have the same device thickness. As a result of this, it can be confirmed that the proposed structure increases the breakdown voltage of 800 V than that of the conventional NPT IGBT without increasing the on-state voltage drop.

Key Words : TIGBT, Trench collector, Breakdown voltage, On-state voltage drop

1. 서론

다양한 파워 반도체 소자들 중에서 IGBT는 현재 개발된 전력용 소자 중 가장 발전된 형태로서 고전압, 대전류, 상대적으로 빠른 스위칭 특성을 두루 갖추고 있다. 이는 IGBT가 바이폴라 트랜지스터의 전류 구동능력과 파워 MOSFET의 전압 구동 및 빠른 스위칭 능력을 결합한 구조이기 때문이다. 특히 기생적인 JFET 영역을 제거하여 온 특성을 향상시키기 위한 수직 구조의 트렌치 게이트 IGBT(TIGBT)가 연구되고 있다[1].

최근에는 대표적인 TIGBT 구조인 PT(punch through) 구조와 NPT(non punch through) 구조가 최적화를 통해 개별적으로 발전해 왔다. 하지만 최적화에도 불구하고 여전히 구조적인 특징에 의해 각각 단점을 가지고 있다. PT TIGBT의 경우 고도핑된 콜렉터 영역에 의하여 온 상태 시 홀의 주입이 과도하기 때문에 턴 오프 손실이 크며 주입된 홀의 활성화 시간(lifetime) 조절이 필요하기 때문에 온-상태 전압강하 역시 증가하게 된다. NPT TIGBT의 경우 n 드리프트 영역 하단에 버퍼 층이 없기 때문에 오프 상태 시 n 드리프트 영역에 삼각형 형태의 전계가 형성되며 이는 상대적으로 긴 n 드리프트 영역의 두께를 요구한다. 따라서 긴 n 드리프트 영역에 의하여 온-상태 전압강하뿐만 아니라 턴 오프 손실 역시 증가하게 된다[2].

본 논문에서는 일반적인 NPT TIGBT의 구조의

1. 고려대학교 전기공학과

(서울시 성북구 안암동 5가 1)

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

접수일자 : 2009. 12. 7

심사완료 : 2010. 2. 11

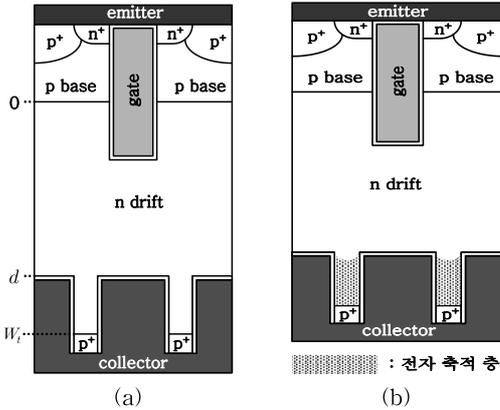


그림 1. 트렌치 콜렉터 TIGBT의 단면도.
 (a) 인가전압이 없는 경우
 (b) 오프 상태인 경우

Fig. 1. A cross section of trench collector TIGBT. (a) At no bias (b) At off-state

콜렉터 영역을 트렌치 콜렉터로 형성함으로써 오프 상태 시 PT TIGBT와 같이 부등변 사각형 형태의 전계를 형성시켜 NPT TIGBT의 단점을 보완하는 트렌치 콜렉터 TIGBT를 제안한다.

2. 제안한 구조

제안한 구조는 그림 1(a)와 같이 일반적인 NPT TIGBT 구조에서 콜렉터 영역을 트렌치 식각한 구조이다. 이때 트렌치 영역에 게이트 산화막과 같은 두께의 산화막을 형성하여 콜렉터 전극과 n 드리프트 영역을 절연시켰다.

그림 1(a)의 트렌치 콜렉터 TIGBT는 오프 상태 시 강한 콜렉터 전압에 의하여 트렌치 영역 하단의 n 드리프트 영역에 그림 1(b)와 같이 전자 축적 층을 형성시킨다. 이렇게 형성된 전자 축적층은 일반적인 PT TIGBT의 버퍼층과 같은 역할을 하여 공핍층 및 전계의 확장을 막아주기 때문에 n 드리프트 영역의 농도가 낮은 경우 NPT TIGBT에서도 PT TIGBT와 같은 부등변 사각형 형태의 전계가 형성되게 된다. 따라서 NPT TIGBT의 단점인 긴 n 드리프트 영역의 길이를 줄일 수 있게 된다.

3. 이론적 분석

오프 상태 시 트렌치 콜렉터 TIGBT의 n 드리프트 영역에 형성되는 전계분포를 분석하기 위하여

표 1. n 드리프트 층의 영역 구분.

Table 1. An area classification of n drift region.

영역 번호	영역 설정	x 좌표 구분
①	트렌치 식각되지 않은 n 드리프트 영역	$0 \leq x \leq d$
②	트렌치 식각된 n 드리프트 영역	$d \leq x \leq W_t$

제안한 구조의 좌표를 그림 1 및 표 1과 같이 설정하였다.

트렌치 콜렉터 TIGBT의 전계분포는 Poisson 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 오프 상태에서 n 드리프트에 존재하는 전하량은 트렌치 식각이 되지 않은 영역과 트렌치 식각이 된 영역이 서로 다르기 때문에 Poisson 방정식을 이용하기 위해 표 1과 같이 n 드리프트 영역을 두 영역으로 구분하였다. ①번 영역의 경우 공핍층이 되었을 때 존재하는 전하는 도너(donor) 이온에 의한 전하밖에 없기 때문에 Poisson 방정식을 이용하여 전계분포식을 구하면 아래와 같다[3,4].

$$E(x) = E(0) - \frac{qN_d}{\epsilon_s}x \quad (1)$$

식 (1)에 $x=0$ 에서의 경계조건 $E(0) = E_{\max}$ 를 대입하면 아래와 같다.

$$E(x) = E_{\max} - \frac{qN_d}{\epsilon_s}x \quad (2)$$

②번 영역의 경우 오프 상태에서 트렌치 콜렉터에 인가되는 높은 전압에 의하여 n 드리프트 영역에 전자 축적 층이 형성되기 때문에 ①번 영역과 비교하여 전하의 종류에 변화가 발생한다. 축적 층에 축적되는 전자의 전하량은 아래와 같이 커패시턴스를 이용하여 수식으로 표현할 수 있다.

$$Q_A = (V_C - V_{FB})C_{OX} \quad (3)$$

이때 Q_A 는 축적층의 총 전하, V_C 는 콜렉터 전압, V_{FB} 는 콜렉터의 전극-산화막-반도체의 MOS 구조에서의 플랫 밴드 전압, C_{OX} 는 MOS 커패시터의 커패시턴스이다. 식 (3)과 같이 축적 층에 축적되는 전자의 농도를 n' 라고 하고 전자를 유도하는 포텐셜을 전하로 표현하여 그 농도를 N'_d 라고 하

면 n' 와 N_d' 를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$|n'| = N_d' = \frac{(V_C - V_{FB})C_{OX}}{q} \quad (4)$$

따라서 공핍 층이 축적 층에 도달하기 이전에 축적 층에 존재하는 전하의 종류는 n, N_d, n', N_d' 이며 공핍 층이 축적 층에 도달하여 축적 층에 존재하는 전자를 공핍시킨 이후에 축적 층에 존재하는 전하의 종류는 N_d, N_d' 이다. 그렇기 때문에 ②번 영역에 공핍 층이 형성되었을 때 전계분포 식을 Poisson 방정식과 $x=d$ 에서의 경계조건 $E(d) = E_{max} - \frac{qN_d}{\epsilon_s}d$ 를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$E(x) = E_{max} + \frac{qN_d}{\epsilon_s}d + \frac{q(N_d + N_d')}{\epsilon_s}(x-d) \quad (5)$$

여기서 $N_d \ll N_d'$ 이므로 $N_d + N_d' \approx N_d'$ 라고 근사화 하고, $V_C \ll V_{FB}$ 이므로 $V_C - V_{FB} \approx V_C$ 라고 근사화한 뒤 식 (4)를 식 (5)에 대입하면 ②번 영역에서의 전계분포 식은 다음과 같다.

$$E(x) = E_{max} + \frac{qN_d}{\epsilon_s}d + \frac{V_C C_{OX}(x-d)}{\epsilon_s} \quad (6)$$

이때 ②번 영역의 수식에서 x 에 공핍 층의 길이 W_d 를 대입했을 때 전계값은 0이 되므로 이를 이용하여 E_{max} 를 구하면 다음과 같다.

$$E_{max} = -\frac{qN_d}{\epsilon_s}d - \frac{V_C C_{OX}(W_d - d)}{\epsilon_s} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (2)와 식 (6)에 대입하여 각 영역의 전계분포 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{cases} E(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s}(d-x) - \frac{V_C C_{OX}(W_d - d)}{\epsilon_s} & (0 \leq x \leq d) \\ E(x) = \frac{V_C C_{OX}(x - W_d)}{\epsilon_s} & (d \leq x \leq W_d) \end{cases} \quad (8)$$

식 (7)의 전계분포 식을 기초로 한 전계분포도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2를 통해서 n 드리프트 영역 중 트랜치 식각이 되지 않은 영역에서는 농도가 매우 낮기 때문에 전계 기울기가 매우 작으며, n 드리프트 영역 중 트랜치 식각이 된 영역에서는 높은 콜렉터 전압에 의하여 전계 기울기가

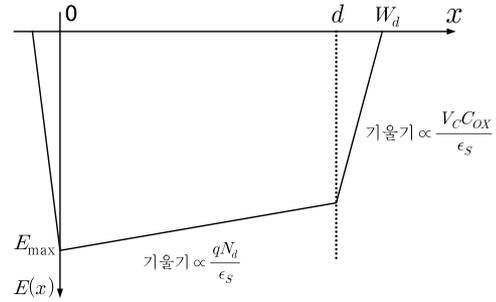


그림 2. 트랜치 콜렉터 TIGBT의 오프 상태 시 전계분포도.

Fig. 2. An electric field distribution of trench collector TIGBT at off-state.

매우 커지기 때문에 일반적인 PT TIGBT와 마찬가지로 부등변 사각형 형태의 전계분포도를 가진다. 따라서 동일한 항복전압을 가지는 NPT TIGBT에 비해서 제안한 트랜치 콜렉터 TIGBT의 경우 그 두께를 상당히 줄일 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 트랜치 콜렉터 TIGBT와 이와 같은 조건의 일반적인 NPT TIGBT의 시뮬레이션을 TSUPREM4와 MEDICI를 이용하여 수행하였으며 그 결과는 아래 표 2와 같다.

표 2의 결과를 살펴보면 트랜치 콜렉터 TIGBT의 경우 일반적인 NPT TIGBT에 비해서 온-상태 전압강하는 0.04 V 증가하면서 항복전압은 약 800 V 향상되었음을 알 수 있다. 우선 항복전압의 향상을 분석하기 위하여 오프 상태에서 n 드리프트 영역에 형성되는 전계분포를 분석하였다. 그림 3(a)의 트랜치 콜렉터 TIGBT와 NPT TIGBT에서 절단선 A-A'와 B-B'를 따르는 전계분포도를 그림 3(b)에 비교하여 나타내었다. 그림 3(b)를 보면

표 2. 시뮬레이션 결과.

Table 2. Simulation result.

	항복전압(V)	온 상태 전압강하(V)
트랜치 콜렉터 TIGBT	1795	1.41
NPT TIGBT	1000	1.37

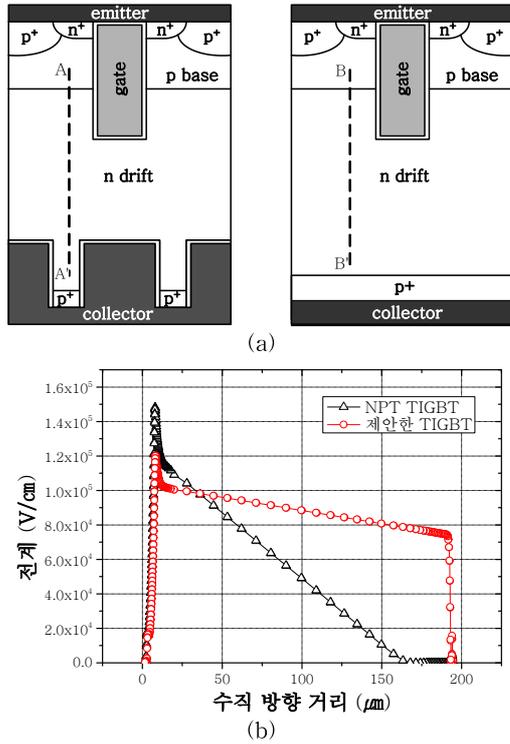


그림 3. 오프 상태 시 트렌치 콜렉터 TIGBT와 NPT TIGBT의 전계분포도.

(a) 트렌치 콜렉터 TIGBT와 NPT TIGBT의 전계분포를 분석하기 위한 절단선.

(b) 트렌치 콜렉터 TIGBT와 NPT TIGBT의 전계분포 비교.

Fig. 3. An electric field distribution of trench collector TIGBT and NPT TIGBT at off-state.

(a) A line for analyzing an electric field distribution of trench collector TIGBT and NPT TIGBT.

(b) An electric field distribution of trench collector TIGBT and NPT TIGBT.

이론적 분석결과와 같이 트렌치 콜렉터 TIGBT의 전계분포가 사각형 형태로 형성됨을 알 수 있으며 NPT TIGBT의 경우에는 삼각형 형태의 전계분포가 형성됨을 알 수 있다. 오프 상태에서 TIGBT 내부에 형성되는 전계분포의 넓이가 항복전압이므로 트렌치 콜렉터 TIGBT는 일반적인 NPT TIGBT에 비하여 약 800 V의 높은 항복전압을

가지게 된다. 반면 트렌치 콜렉터 TIGBT의 n 드리프트 영역의 하단부에 저항이 증가하고 n 드리프트 영역과 p+ 콜렉터 영역간의 자생 전압이 증가하기 때문에 온 상태 전압강하는 0.04 V 증가하지만 이는 항복전압에 비하여 매우 작은 값이다.

5. 결론

본 논문에서는 일반적인 NPT TIGBT의 구조의 콜렉터 영역을 트렌치 콜렉터로 구성함으로써 오프 상태 시 전계분포를 PT TIGBT와 같이 부등변 사각형으로 형성하여 항복전압을 향상시키는 트렌치 콜렉터 TIGBT를 제안하였다. 또한 이론적인 분석을 통하여 오프 상태 시 사각형 형태의 전계분포가 형성됨을 예상하였고 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며 그 결과 일반적인 NPT TIGBT에 비해 제안한 트렌치 콜렉터 TIGBT는 온-상태 전압강하는 0.04 V 증가하지만 항복전압이 약 800 V 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] G. Majumdar and T. Minato, "Recent and future IGBT evolution", Power Conversion Conference Proc., p. 355, 2007.
- [2] Y. I. Choi, "Yesterday and tomorrow of the power semiconductor devices", J. of KIEE(in Korean), Vol. 46, No. 2, p. 13, 1997.
- [3] B. J. Baliga, "Power semiconductor devices", PWS Publishing Company, p. 426, 1996.
- [4] V. K. Khanna, "IGBT theory and design", John Wiley & Sons, p. 229, 2003.
- [5] S. Kyoung, J.-S. Lee, S.-H. Kwak, E.-G. Kang, and M. Y. Sung, "A novel trench IGBT with a deep P+ layer beneath the trench emitter", IEEE Electron Device Letters, Vol. 30, No. 1, p. 82, 2009.
- [6] J.-S. Lee, E.-G. Kang, and M. Y. Sung, "Shielding region effects on a trench gate IGBT", Microelectronics Journal, Vol. 39, No. 1, p. 57, 2008.