

Trench와 FLR을 이용한 새로운 접합 마감 구조

A New Junction Termination Structure by Employing Trench and FLR

河珉宇* · 吳在根** · 崔然益*** · 韓民九§
(Min-Woo Ha · Jae-Keun Oh · Yearn-Ik Choi · Min-Koo Han)

Abstract - We have proposed the junction termination structure of IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) by employing trench and FLR (Field Limiting Ring), which decrease the junction termination area at the same breakdown voltage. Our proposed junction termination structure, trench FLR is verified by numerical simulator MEDICI. In 600V rated device, the junction termination area is decreased 20% compared with that of the conventional FLR structure. The breakdown voltage of trench FLR with 4 trenches is 768 V, 99 % of ideal parallel-plane junction(1-D) BV_{ceo} .

Key Words : Junction termination, Breakdown, Trench, Ring, FLR

1. 서론

전력 반도체 소자 설계 시 항복 전압 특성은 소자가 고압의 순방향 저지 전압 (Forward blocking voltage)을 견뎌야 하므로 매우 중요하다. 이상적인 항복 전압의 경우 전계가 균일하게 분포하는 무한한 길이의 접합을 가정하여 계산할 수 있다. 그러나 실제적으로 반도체 소자의 접합은 무한하지 않으므로 소자의 접합이 끝나는 영역에 전계가 집중되어 이상적인 항복 전압에 비해 낮은 전압에서 애벌런치 항복이 일어난다. 그러므로 접합 마감 기술을 적용하여 접합 마감 영역을 설계해서 높은 항복 전압을 얻어야 한다[1]. 접합 마감 영역의 항복 전압은 비저항, 드리프트 영역의 두께, 표면의 접합 깊이, 공핍 영역의 반경의 기울기, 표면 상태로 결정된다.

기존 접합 마감 기술인 FLR (Field Limiting Ring)은 다른 기술에 비해 쉬운 설계 및 간단한 공정 제작 과정으로 인해 접합 마감에 널리 이용되었다[2,3]. FLR은 높은 이온 주입 (High dose ion implant)으로 표면에 P+ FLR을 설계하여 구현한다. P+ FLR은 공핍영역의 경계를 완만하게 하여 높은 전계를 접합 주위로 분산시키는 역할을 한다. 소자 내 최대 전계값이 감소되면, 애벌런치 증가 배수가 감소하여 전력용 반도체 소자의 항복 전압이 높아진다. 그러나 FLR은 여러 개의 P+ 접합을 사용하여 반도체 소자의 면적이 증가하는 단점이 있다.

최근 트렌치 (trench) 공정은 전력용 소자를 포함하여 대부분의 반도체 소자 공정에서 널리 이용된다. 본 논문은 앞

은 실리콘 트렌치를 접합 마감에 응용하여 기존 FLR 기술에 비해 면적 증가 없이 이상적인 항복 전압 특성으로 개선하고자 한다. 제안된 트렌치 FLR 구조는 2차원 수치해석 시뮬레이터 MEDICI[4]로 기존 FLR 구조와 비교함으로써 전기적 특성을 검증하였다.

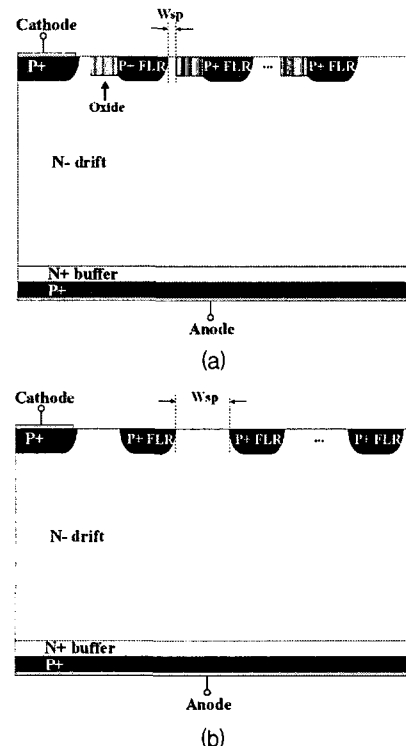


그림 1 접합 마감 구조 단면도 (a) 제안된 트렌치 FLR (b) 기존 FLR

Fig. 1 The cross sectional view of (a) proposed trench FLR (b) conventional FLR

* 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 博士課程
 ** 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 博士課程
 *** 正會員 : 亞洲大學校 電子學科部 教授 · 工博
 § 正會員 : 서울대학교 電氣學科部 教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 12月 17日
 最終完了 : 2003年 4月 11日

2. 제안된 트렌치 FLR의 구조 및 설계

그림 1은 제안된 트렌치 FLR과 기존 FLR의 단면 그림이다. 트렌치 FLR은 600 V급 이상에서 전력용 MOSFET보다 전류 구동 능력이 우수한 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자에 적용하기 위해서 PNP 바이폴라 트랜지스터의 BV_{ceo} 로 검증하였다. 트렌치 FLR의 항복 전압 특성을 최적화된 기존 FLR과 비교하였다. 트렌치 FLR 구조는 PN 다이오드나 바이폴라 트랜지스터 등으로 응용할 수 있다.

제안된 트렌치 FLR의 이상적인 항복 전압(1-D) BV_{ceo} 을 구하는 식은 다음과 같다. E_c 는 임계 전계, N^- 드리프트의 농도와 너비는 각각 N_{drift} , W_{drift} 이며, $T_{N+buffer}$ 는 N+ 버퍼 두께이다. 이상적인 BV_{ceo} 의 MEDICI 수치 해석값은 772 V로 수식적으로 구한 값 774.97 V와 일치함을 확인하였다.

$$BV_{cbo} = BV_{punch-through} = \frac{1}{2} (Ec + Ec - \frac{qN_{drift}}{\epsilon_s} W_{drift}) W_{drift}$$

$$= 934.34 V$$

$$\alpha = \frac{1}{\cosh(\frac{T_{N+buffer}}{L_p})} = \frac{1}{\cosh(\frac{T_{N+buffer}}{\sqrt{D_p \tau_p})}} = 0.69878$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = 2.32$$

$$\therefore BV_{ceo} = \frac{BV_{cbo}}{\beta^n} = 774.97 V$$

제안된 트렌치 FLR은 P+ FLR과 P+ FLR 옆에 형성한 알은 실리콘 트렌치에 실리콘 산화막을 증착하여 제작한다. 트렌치 FLR은 실리콘 산화막을 증착한 트렌치와 P+ FLR을 설계하여 캐소드에 집중된 전계를 분산시켜 접합 마감 영역에 걸리는 최대 전계값을 낮춘다. 실리콘 산화막은 300 K에서 상대 유전율이 3.9로 실리콘 11.9의 1/3이므로 이상적으로 실리콘의 3배의 전계를 지탱한다. 같은 항복 전압에서 트렌치 FLR의 W_{sp} 은 기존 FLR의 W_{sp} 보다 적게 설계해야하므로 접합 마감 면적이 감소한다.(그림1) 따라서 트렌치 FLR은 기존 FLR에 비해 같은 항복 전압에서 적은 면적에 설계할 수 있다. 그리고 트렌치와 FLR 개수를 늘려 설계하여 항복 전압을 이상적인 항복 전압 까지 높일 수 있다. 트렌치 FLR 공정은 베벨 에지 에치 (bevel edge etch) 같은 복잡한 공정이 요구되지 않으며 기존 트렌치 IGBT 공정과 호환이 된다. 또한 실리콘 트렌치 깊이가 3 μm 로 얇아 깊은 트렌치 (deep trench)를 이용하는 기존 접합 마감 기술보다 플라즈마 데미지를 적게 받는 장점이 있다[5]. 트렌치 FLR의 설계 변수를 그림 2와 표 I에서 나타내었다. 제안된 접합 마감 구조는 600 V급 펀치 스루 (Punch-Through) IGBT 설계인 N- 드리프트 층의 농도 $10^{14}cm^{-3}$, 두께 50 μm 조건에서 설계하였다.

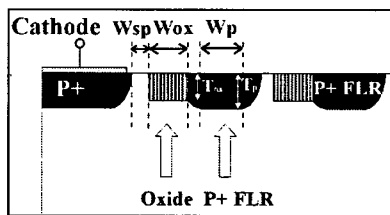


그림 2 제안된 트렌치 FLR의 설계 변수
Fig. 2 The design parameters of proposed trench FLR

표 1 제안된 트렌치 FLR의 설계 변수

Table 1 The design parameters of proposed trench FLR

트렌치	깊이 (T_{ox})	3 μm
P+ 캐소드 & P+ FLR	도핑 농도	$10^{19} cm^{-3}$
	접합 너비 (W_p)	5 μm
N- 드리프트	접합 깊이 (T_p)	5 μm
N+ 버퍼	도핑 농도	$10^{14} cm^{-3}$
	너비	200 μm
	두께	50 μm
	도핑 농도	$10^{16} cm^{-3}$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안된 트렌치 FLR는 트렌치와 P+ FLR을 각각 1개씩 설계한 구조에서부터 최적화를 하였다. 트렌치 FLR의 디자인 변수 중에서 트렌치 깊이 (T_{ox}), 트렌치 너비 (W_{ox})와 P+ 캐소드와 트렌치 사이의 거리 (W_{sp})는 항복 전압 특성에 민감하였다. 그림 3은 트렌치를 1개를 이용한 트렌치 FLR 구조에서 T_{ox} 에 따른 항복 전압 특성을 나타낸 그림이며, 트렌치 깊이가 3 μm 일 때 가장 높은 항복 전압을 가진다. 트렌치 깊이가 3 μm 보다 적으면 트렌치에 전계가 적게 걸리며, 3 μm 보다 크면 트렌치 좌측 하단의 모서리에 전계가 집중된다. 또한 트렌치 FLR의 항복 전압 특성은 $W_{ox} + W_{sp}$ 에 따라 민감하게 변한다. 그림 4는 트렌치 1개를 설계한 트렌치 FLR의 $W_{ox} + W_{sp}$ 에 따른 항복 전압을 나타낸 그림이다. 트렌치 1개를 설계한 트렌치 FLR 구조에서 $W_{ox} + W_{sp}$ 가 8 μm 일 때 가장 높은 항복 전압 521 V를 나타낸다. 트렌치 FLR 구조에서 $W_{ox} + W_{sp}$ 가 8 μm , 9 μm 로 일정할 때는 서로 W_{ox} 나 W_{sp} 가 변해도 항복 전압이 거의 일정하고, $W_{ox} + W_{sp}$ 가 다른 값을 가질 때보다 높은 항복 전압 특성을 보여준다. 트렌치 FLR 구조는 $W_{ox} + W_{sp}$ 의 특정한 최적화된 값에 따라 높은 항복 전압 특성을 가지며, 디자인 변수(W_{ox} , W_{sp})가 변하여도 항복 전압 특성에 민감하지 않는 특성을 가진다. 즉, 트렌치 FLR 구조의 항복 전압 특성에 영향을 미치는 중요한 설계 변수는 트렌치 너비와 트렌치와 P+ FLR 사이의 거리의 합을 의미한다. 그 이유는 트렌치 FLR에 걸리는 전계가 트렌치, 트렌치와 P+ FLR 사이의 N- 드리프트에 나뉘서 분포하기 때문이다.

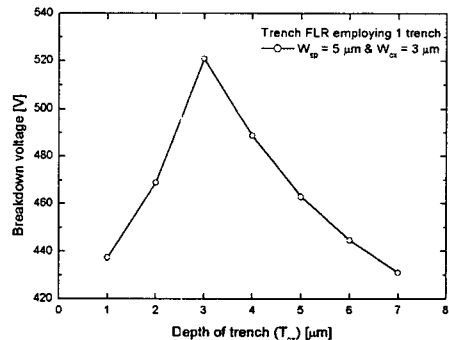


그림 3 제안된 트렌치 FLR의 트렌치 깊이에 따른 항복 전압 특성

Fig. 3 The breakdown voltage characteristics with trench depth of the proposed trench FLR

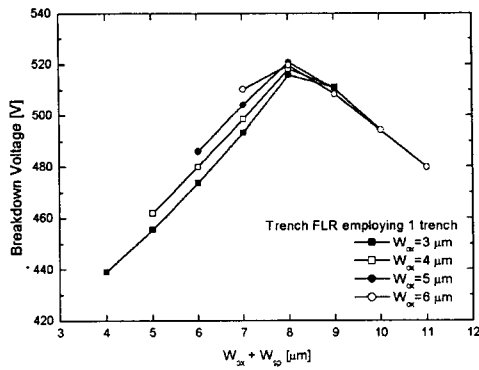


그림 4 제안된 트렌치 FLR의 $W_{ox} + W_{sp}$ 에 따른 항복 전압 특성
 Fig. 4 The breakdown voltage with $W_{ox} + W_{sp}$ of the proposed trench FLR

그림 5는 제안된 트렌치 FLR의 전계를 분석한 그림이다. 트렌치 1개를 사용한 트렌치 FLR의 전계 분포가 P+ FLR을 1개를 사용한 최적화된 기존 FLR의 전계 분포보다 잘 분산되어있음을 확인할 수 있다. 트렌치 FLR의 전계 분포는 삼각형 형태의 기존 FLR의 전계 분포보다 넓은 최대값을 2개를 가지는 다각형 모양이다. 면적에 대한 전계 분포의 적분 값이 항복 전압이므로 사용한 FLR 개수가 같은 경우 트렌치 FLR이 기존 FLR보다 높은 항복 전압 특성을 가짐을 알 수 있다.

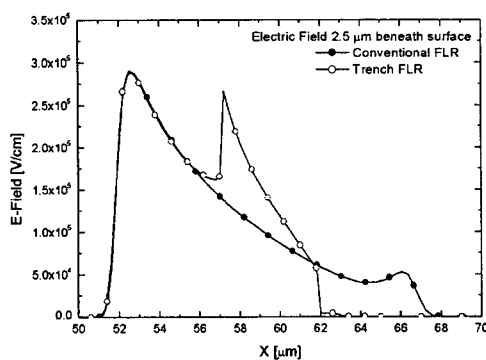
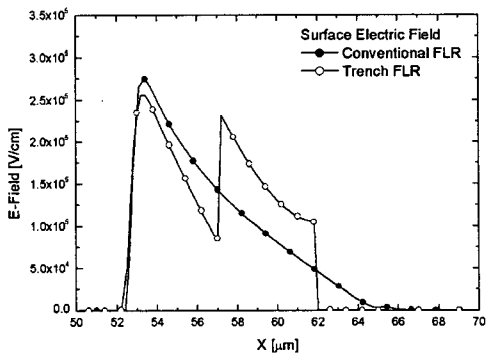


그림 5 제안된 트렌치 FLR의 전계 분포 (a) 표면 전계 (b) 표면에서 2.5 μm 깊이의 전계
 Fig. 5 (a) Surface electric field (b) electric field 2.5 μm beneath surface distribution of proposed trench FLR

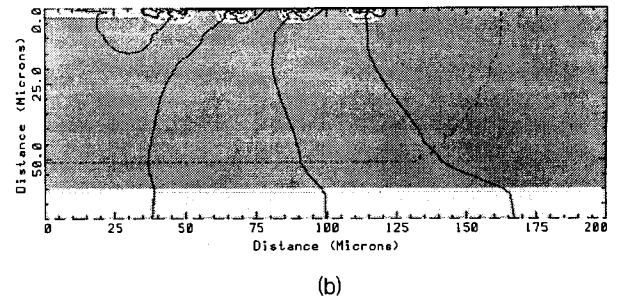
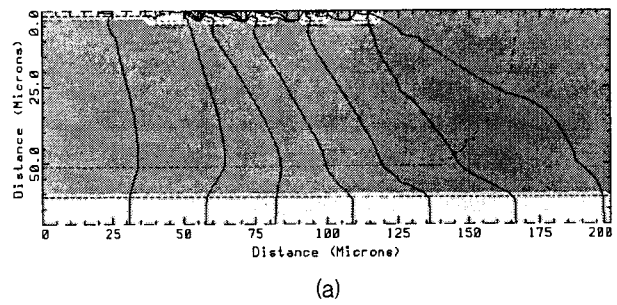


그림 6 공핍 영역 경계 및 누설 전류 flow line (a) 제안된 트렌치 FLR (b) 기존 FLR
 Fig. 6 The depletion region and flow line of leakage current (a) proposed trench FLR (b) conventional FLR

그림 6은 제안된 트렌치 FLR와 기존 FLR이 cylindrical 모양의 공핍 영역 경계와 누설 전류 flow line을 나타낸 그림이다. 트렌치 4개를 설계한 트렌치 FLR의 항복 전압 (=768 V) 직전의 공핍 영역과 FLR 3개를 설계한 기존 FLR의 항복 전압 (=699 V) 직전의 공핍 영역의 넓이가 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 트렌치 FLR은 기존 FLR에 비해 적은 공핍 영역을 가져 감소된 접합 마감 면적 특성을 가진다.

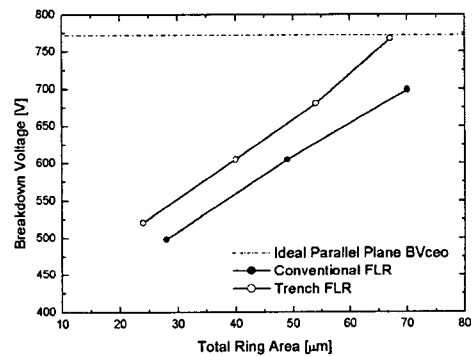


그림 7 제안된 트렌치 FLR의 사용된 트렌치 개수에 따른 접합 마감 면적과 항복 전압
 Fig. 7 The breakdown and junction termination area of proposed trench FLR with number of used ring

제안된 트렌치 FLR의 항복 전압을 늘리기 위하여 트렌치 개수를 늘려 확장하였다. 그림 7은 트렌치 FLR과 기존 FLR의 사용한 트렌치, FLR 개수에 따른 접합 마감 면적과 항복 전압을 나타낸 그림이다. 트렌치 FLR은 사용된 트렌치 개수가 증가할수록 일정하게 항복 전압이 증가한다. 트렌치 FLR

은 트렌치 4개를 사용하여 이상적인 항복 전압 BV_{ceo} 772 V의 99 %인 768 V까지 얻었다. 트렌치 3개를 사용한 트렌치 FLR의 접합 마감 면적과 항복 전압은 $54 \mu\text{m}$ 과 680 V임 반면에 기존 FLR은 각각 $49 \mu\text{m}$, 605 V이었다. 트렌치 FLR은 같은 항복 전압에서 기존 FLR에 비해 접합 마감 면적을 성공적으로 20 % 감소시켰다.

3. 결 론

항복 전압 특성을 희생시키지 않으면서 접합 마감 면적을 감소시킨 트렌치 FLR을 제안하였다. 제안된 트렌치 FLR은 얇은 실리콘 트렌치에 실리콘 산화막을 증착시키고, 전계 분포를 트렌치와 P+ FLR의 최적화된 배열에 의하여 2개의 최대값을 가지는 형태로 바꿔 성공적으로 접합 마감 특성을 개선시켰다. 제안된 접합 마감 구조는 실리콘 산화막 트렌치와 P+ FLR을 설계하여 항복 전압 특성의 열화 없이 기존 FLR에 비해 면적을 20 %만큼 감소시켰으며, 트렌치 4개를 설계하여 이상적인 항복 전압의 99 %를 얻었다. 트렌치 FLR의 제작 공정은 베벨 에지 에치와 같은 복잡한 공정 과정을 필요하지 않으며, 트렌치 구조를 이용한 IGBT 등의 소자에 이용하면 별도의 실리콘 식각 공정 없이 항복 전압 특성을 개선할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지원하에 특정 연구 개발 사업으로 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Jayant Baliga, Power semiconductor devices, PWS Publishing Company, pp. 81-113, 1995.
- [2] Michael S. Adler, et al, "Theory and breakdown voltage for planar device with a single field limiting ring", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-24, No. 2, February 1977.
- [3] V. Macary, et al., Comparison between biased and floating guard rings used as junction termination technique, ISPSD'92, pp. 230-233, 1992.
- [4] MEDICI Version 4.1 User's Manual, Avanti.
- [5] Chanho Park, et al., A new junction termination technique using ICP RIE for ideal breakdown voltages, ISPSD'02, pp. 257-260, 2002.