

트렌치를 이용한 고전압 SiC 반도체 소자의 접합마감 연구

곽재원*, 김형우**, 석오균**, 문정현**, 방 옥**, 김남균**, 최강민*, 하민우*
 명지대학교*, 한국전기연구원**

Junction Termination of High-Voltage SiC Power Devices Using a Trench

Jaewon Kwag*, Hyoung-Woo Kim**, Ogyun Seok**, Jeong Hyun Moon**,
 Wook Bahng**, Nam-Kyun Kim**, Kang Min Choi*, and Min-Woo Ha*†
 Myongji University*, Korea Electrotechnology Research Institute**

Abstract - 4H-SiC는 차세대 전력용 반도체로서 고전압, 고전류, 고온 동작에 적합하여 각광을 받고 있다. 전력용 반도체의 항복전압 개선하기 위하여 활성 (active) 영역의 주위에 설계하는 접합마감 (junction termination) 영역의 설계가 필수적이다. P+ 이온주입 및 활성화가 어려운 SiC 특성상 0.5 μm 보다 깊은 P+ 접합을 구현하기 어려운 특성상 기존 P+ FLR의 접합마감 소자는 항복전압을 개선하기 어렵다. 접합마감 소자의 항복전압을 효과적으로 증가시키기 위하여 트렌치를 설계하였다. 기존 접합마감 소자의 길이와 항복은 7 μm 와 473.0 V이지만, 제안된 접합마감 소자의 길이와 항복전압은 5 μm 와 993.4 V로 우수하였다.

항복전압을 확보하였다.

항복전압을 더 개선하기 위하여 접합마감 영역에 P+ FLR과 실리콘 산화막을 채운 트렌치 구조 [3]를 추가하여, 접합마감 소자 (type A)를 제안하였다. 메인 접합과 트렌치의 간격을 2 μm 로 유지시키고 트렌치의 깊이를 변수로 설정하여 연구를 진행했다. 그림 1(b)는 트렌치의 깊이가 3 μm 일 때의 구조이다. 트렌치의 깊이가 깊어짐에 따라 항복전압도 증가하는 것을 볼 수 있었다. 트렌치 깊이가 1 μm 에서 5 μm 로 깊어짐에 따라 항복전압이 451.2 V에서 497.6 V로 증가하였다. 그러나 제안된 접합마감 소자 (type A)의 경우 전계가 메인접합, 트렌치, P+ FLR 주변에 분산되지 않고, 메인접합과 트렌치에 집중되는 것을 확인하였다. 따라서 P+ FLR을 설계하지 않고 트렌치로만 전계를 분산하는 2번째 새로운 구조 (type B)를 제안하였다.

1. 서 론

반도체 기술이 발달하면서 반도체 소자는 더욱 더 소형화되고, 집적화가 이루어지고 있다. 기존의 실리콘 반도체 소자는 연구 진행이 포화됨에 따라 한계점에 도달하고 있다. 이러한 한계를 해결하기 위해 다른 물질의 반도체 연구가 진행되고 있다. 여러 가지 물질의 반도체 중에서 SiC 반도체소자는 기존의 실리콘 반도체 소자에 비해 여러 가지 전기적으로 우수한 성질을 가지고 있다. SiC는 기존의 반도체 재료인 실리콘보다 3배 큰 밴드 갭 (band gap)을 가지고 있다. 이런 성질은 반도체가 고온에서 동작하기에 유리한 조건이다. 누설전류 (leakage current)는 진성캐리어 농도의 제곱에 비례하게 되는데 고온일 경우 진성캐리어 농도는 증가하게 되고 따라서 누설전류도 증가되어 소자의 동작 안정성이 떨어진다. 실리콘에 비해 낮은 진성캐리어농도를 갖는 SiC는 고온에서의 안정된 동작 특성을 갖는다.

또한 SiC는 실리콘에 비해서 최대임계전계 (critical field)가 10배 크다.[2] 반도체 소자에서의 온 저항 (on-resistance)은 최대임계전계의 제곱에 반비례하고 드리프트 층의 두께는 기존의 실리콘에 비해서 10배 정도 작다. SiC의 성질은 반도체 소자 크기의 소형화를 가능하게 하고, 셀 밀도를 개선할 수 있다. SiC의 전자의 포화속도 (saturation velocity)가 실리콘의 값보다 2.7배 빠르다. 이 특성은 SiC 반도체 소자가 기존의 실리콘 반도체 소자보다 빠른 포화전자속도로 빠른 스위칭이 가능하도록 하고 소자의 스위칭 손실을 보다 줄일 수 있도록 한다.[1-2]

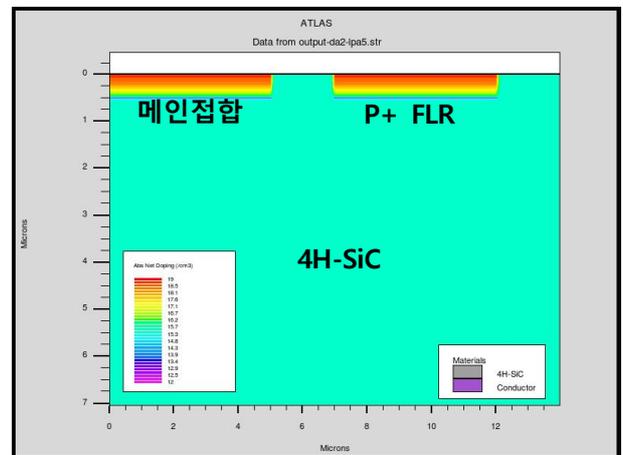
반도체 소자의 항복전압을 개선하기 위하여 활성 (active) 영역 주위에 접합마감 (junction termination) 영역을 설계해야 한다. 다양한 접합마감 구조 중 하나인 FLR (field limiting ring)는 메인 접합 이외에 플로팅 P+ 접합을 생성함으로써 설계한다. P+ FLR은 메인 접합 (VDMOS의 경우 P+ 캐소드, IGBT의 경우 P+ 이미터)에 걸리는 전계를 분산시켜 항복전압이 개선하는 결과를 얻을 수 있다.[3-4] 반면 SiC 반도체 소자의 P 접합은 0.5 μm 보다 깊은 접합을 만들기 어려우므로 단순 FLR 기술은 항복전압을 개선시키는데 제한을 가지고 있다.

본 논문은 4H-SiC 전력용 반도체의 항복전압을 개선하기 위하여 실리콘 산화막이 채워진 트렌치 구조와 P+ FLR을 이용한 접합마감 소자를 제안하였다. 이차원 수치해석 시뮬레이션을 이용하여 제안된 접합마감 소자의 항복전압을 진행하였다.

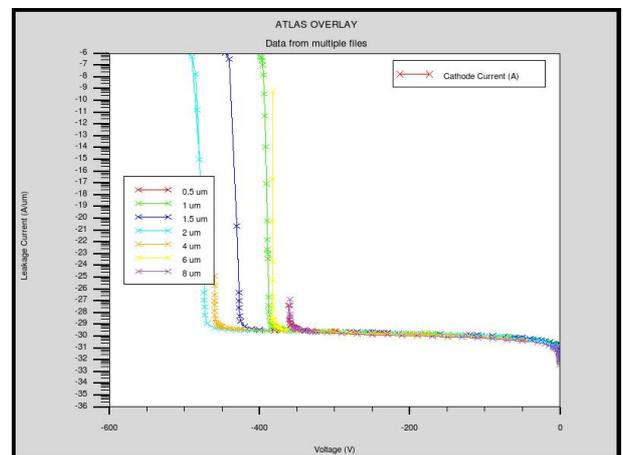
2. 본 론

2.1 트렌치와 P+ FLR을 설계한 제안된 접합마감 소자 (type A)

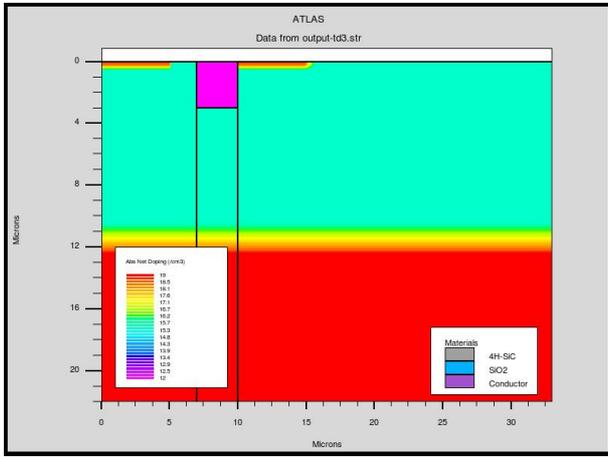
접합마감 연구 시작은 1 개의 P+ FLR을 설계한 접합마감 설계부터 진행하였다. N-드리프트 층의 두께는 12 μm 이고 농도는 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 메인 접합의 두께와 길이는 각각 0.5 μm , 5 μm 로 설계하였고, P+ FLR 역시 메인 접합과 같은 구조로 설계하였다. 주어진 반도체 구조의 이상적인 일차원 평행면 항복전압과 이차원 항복전압은 2204.1 V와 455.0 V이었다. 메인 접합과 P+ FLR의 간격을 변수로 두어 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 1(a)는 1개의 P+ FLR을 설계한 소자의 항복전압 데이터이다. 메인 접합과 P+ FLR의 거리가 2 μm 일 때, 473.0 V의 최대



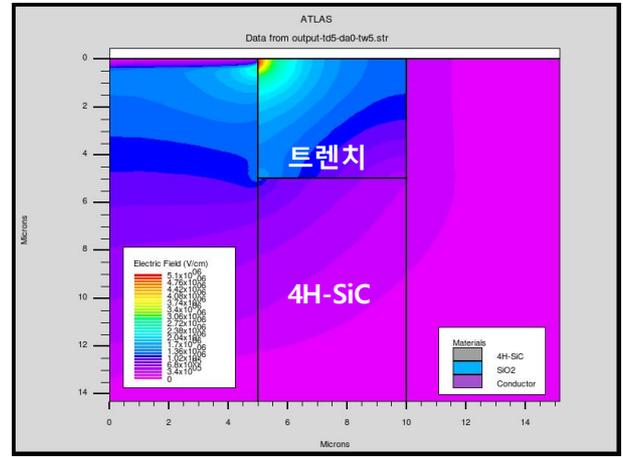
(a)



(b)



(c)



(b)

〈그림 1〉 (a) 1개 P+ FLR를 설계한 기존 4H-SiC 접합마감 소자, (b) 1 개의 P+ FLR 구조의 항복전압 특성 및 (c) 1개의 트렌치와 1개의 P+ FLR를 이용한 제안된 4H-SiC 접합마감 소자 (type A)

〈그림 2〉 (a) 제안된 접합마감 소자의 항복전압 특성 (type B) 및 (b) 제안된 접합마감 소자의 항복 시 전계 분포

2.2 트렌치만을 이용한 제안된 접합마감 소자 (type B)

4H-SiC 반도체 소자의 경우 현실적으로 P+ 접합깊이가 0.5 μm 보다 깊지 않는 제약조건에서 접합마감 소자의 항복전압을 개선하기 위해서 새로운 구조 (type B)를 제안하였다. 제안된 접합마감 소자 (type A)의 항복전압 시 전계가 주로 메인접합과 실리콘 산화막이 채워진 트렌치에 집중되는 것을 확인하였고, 트렌치로만 이용하여 설계한 새로운 접합마감 소자를 제안하였다. 트렌치의 깊이는 5 μm 로 고정되었다. 메인 접합과 트렌치의 간격을 거리를 1 μm 인 경우, 트렌치의 깊이를 6 μm 에서 7 μm 로 증가시켰을 때는 항복전압이 584.8 V에서 596.1 V로 증가하였다. 그 이유는 메인 접합에 실리콘 산화막이 채워진 트렌치가 길어질수록 역방향 전계가 걸리는 접합마감 소자의 영역이 증가하였기 때문이다.

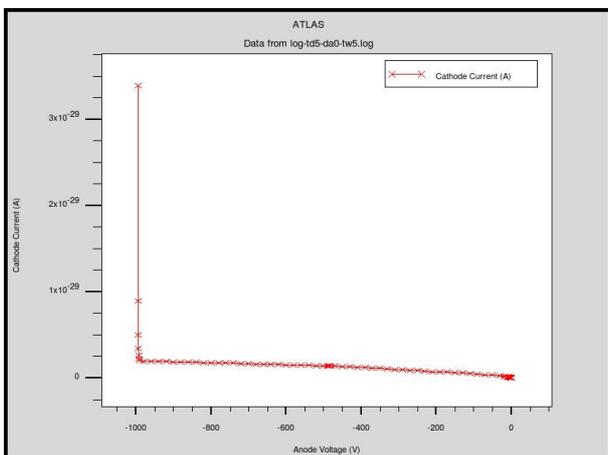
최종적으로 트렌치의 두께와 깊이를 5 μm 로 고정된 상태에서 메인 접합과 트렌치와의 간격을 2 μm 에서 0 μm 로 감소시켰다. 이 결과 항복전압이 476.8 V에서 993.4 V로 2배 이상 증가되었다. 그림 2(a)는 메인 접합과 트렌치 사이의 간격이 0 μm , 트렌치의 깊이, 길이가 모두 5 μm 인 제안된 접합마감 소자의 시뮬레이션 항복전압 특성이다. 항복전압이 993.4 V에 높음을 알 수가 있다. 그림 2(b)는 제안된 접합마감 소자의 항복 시 전계 분포이다. 기존의 구조에서 전계가 메인 접합에 집중되었지만, 제안된 접합마감 소자의 경우 메인 접합과 트렌치를 붙여서 넓고 깊은 트렌치에 전계가 분산되어 항복전압을 효과적으로 개선함을 알 수 있었다. 제안된 실리콘 산화막이 채워진 트렌치를 이용한 접합마감 소자는 4H-SiC의 수직형 MOSFET이나 IGBT에 적용이 가능하며, 기존 FLR에 비하여 접합마감 깊이를 감소하였으며, 항복전압을 증가하였다.

3. 결 론

차세대 4H-SiC 전력용 반도체의 접합마감 소자가 제안되었다. 제안된 접합마감 소자는 접합마감 깊이를 줄이면서, 효과적으로 항복전압을 증가하였다. 4H-SiC의 깊은 P+ 접합을 구현하기 어렵기 때문에 기존 P+ FLR 접합마감 소자는 효과적으로 역방향 전계를 분산시키지 못하며, 최대 전계를 감소하지 못한 단점을 가지고 있다. 실리콘 산화막이 채워진 트렌치를 이용한 제안된 접합마감 소자는 트렌치에 전계를 걸리게 하여 작은 접합마감 깊이에서 높은 항복전압을 효과적으로 확보하였다. 제안된 접합마감 구조는 4H-SiC 수직형 MOSFET이나 IGBT에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] 김상철, “탄화규소 전력반도체 기술 동향”, 전자공학회지, 제37권 제 8호, p.787-790, 2010
- [2] 강인호, 방옥, 문정현, 나문경, “SiC 전력반도체 소자기술 동향”, 세라미스트, 제16권 제4호, p.7-9, 2013
- [3] Min-Woo Ha, Jae-Keun Oh, Yearn-Ik Choi, Min-Koo Han, “The Junction Termination Design Employing Shallow Trench and Field Limiting Ring for 1200V-Class Devices”, 전기학회논문지, 제53권 제6호, p.300-303, 2004
- [4] 윤상복, 최연익, “Buried ring이 있는 FLR(Field Limiting Ring)구조의 항복특성”, 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p.1686-1688, 1999



(a)