

수평형 애노드-스위칭 사이리스터(LAST)의 전류-전압 온도 특성

하민우, 이유상, 전병철, 김수성, 최연익*, 한민구
 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, *아주대학교 전자공학부

I-V Characteristics of Lateral Anode Switched Thyristor(LAST) at Elevated Temperature

Min-Woo Ha, You-Sang Lee, Byung-Chul Jun, Soo-Seong Kim, Yearn-Ik Choi*, and Min-Koo Han
 School of Electrical Engineering & Computer Science Seoul National University, *Ajou University

Abstract - 개선된 FB-SOA 및 낮은 턴-오프 시간의 특성을 가지는 수평형 애노드-스위칭 사이리스터(LAST)의 고온에서의 전류-전압 특성을 연구하였다. LAST는 고온에서도 훌륭한 전류 포화 특성을 가져 개선된 FB-SOA의 특성을 보였다. 고온에서 LAST의 순방향 전압 강하는 감소되었다. 또한 LAST는 온도가 상승함에 따라 포화 전류가 감소하여, 병렬연결 동작 시에 전류 균형 특성을 기대할 수 있다.

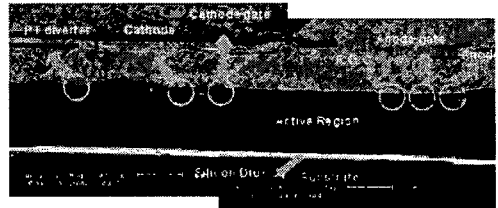


그림2. 제작된 LAST의 SEM 사진

1. 서 론

MOS-게이트 사이리스터는 MOSFET의 높은 입력 임피던스와 사이리스터의 낮은 순방향 전압 강하 때문에 고전력 분야에서 주목을 받고 있다. [1-2] 수평형 애노드-스위칭 사이리스터(LAST)라 불리는 MOS 게이트 제어 사이리스터는 증가된 SOA 및 낮은 턴-오프 시간을 가지며, 제안되었으며 제작된바 있다. [3] LAST는 기생 사이리스터의 래치-업과 regenerative 동작의 제거로 인하여 생기는 전류 포화 손실과 긴 턴-오프 시간을 극복하였다. 본 논문은 LAST의 온도 특성을 분석하였으며, 같은 웨이퍼에서 제작된 수평형 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(LIGBT)와 결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 소자 제작

그림 1은 고온에서 전류-전압 특성을 연구한 LAST의 구조이다. 기생 사이리스터의 래치-업을 제거하기 위해 애노드 아래의 p+ 층을 n+ 층으로 대체하였다. n+ 층으로 인해 기생 사이리스터는 성공적으로 제거되어 LAST의 SOA를 개선하였다. 캐소드 영역의 p+ 다이버터는 턴-오프 동작 때 n-드리프트 영역의 정공을 캐소드로 밀어내기 위해 설계되었으며, p+ 다이버터를 제작하지 않는 LAST에 비해 턴-오프 시간이 감소되었다. 제안된 LAST는 그림 2와 같이 제작되었다. 제작 공정은 기존 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터 공정과 호환되며 복잡하지 않다.

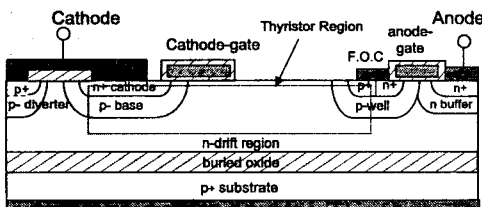


그림 1. 제안된 LAST의 단면도

2.2 소자 동작 원리

턴-온 동작 때 캐소드-게이트와 애노드-게이트에 양의 전압이 걸린다. 낮은 애노드 전압($< 0.8 V$)에서 제안된 LAST는 수평형 이중 확산 MOS펫(LDMOSFET)과 같이 동작한다. 플로팅 오믹 콘택(FOC) 아래의 p+ 층과 n-드리프트 영역의 전압 차이가 0.7 V에 도달하면, 애노드 전압이 상승함에 따라 FOC 아래의 p+ 층에서 n-드리프트 영역으로 정공이 주입된다. 주입된 정공들은 p-베이스에 축적된다. 캐소드 영역의 p-n 접합이 동작하면 사이리스터 동작이 시작된다. 이 때 FOC의 전하 보존에 의하여 같은 양의 전자가 양의 전압이 걸린 애노드-게이트 아래의 n 채널을 통해 n+ 애노드로 빠져나가 LAST는 NMOSFET의 애노드-게이트 전압에 의하여 성공적으로 제어된다. [4]

턴-오프 동작에는 캐소드-게이트와 애노드-게이트에 음의 전압이 걸려 더 이상 전자들이 캐소드에서 n-드리프트 영역으로 주입되지 않게 한다. N-드리프트 영역에 있는 정공들은 p+ 다이버터를 통해 캐소드로 빠져나가 LIGBT에 비해 스위칭 특성이 개선된다.

2.3 LAST의 온도 특성

그림 3은 제안된 LAST의 측정된 온도에 따른 순방향 전류-전압 특성이다.

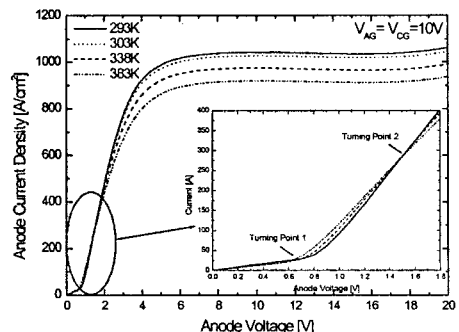


그림 3. 온도에 따른 측정된 LAST의 순방향 전류-전압 특성

낮은 애노드 전압(< 0.6 ~ 0.8 V)에서 LAST의 애노드 전류 밀도는 LAST가 LDMOSFET 동작하기 때문에 온도가 상승할수록 감소한다. 이는 LDMOSFET이 격자 산란이 우세한 소수캐리어 소자임을 의미한다. 그러나 적은 애노드 전압에서 LDMOSFET의 전류는 표면이 아니라 기판 n-드립트 영역을 통해 흐르기 때문에 LAST의 순방향 전압 강하는 크게 감소되지 않는다. 애노드 전압이 상승함에 따라 LAST의 소수 캐리어 주입 인한 전도도 변화가 그림 3의 turning point 1과 turning point 2 사이에서 일어난다. LAST의 애노드 전류 밀도는 온도가 상승함에 따라 소수 캐리어 수명시간이 증가하는 바이폴라 소자처럼 증가한다. 애노드 전압이 1.6 V 보다 증가하면 (그림 3의 turning point 2를 지난 후) FOC의 전하 보존에 의하여 애노드 게이트 아래의 전자 전류 밀도가 정공 전류 밀도와 같이 높아진다. 이는 표면에서의 격자 산란에 의하여 LAST의 전체 애노드 전류 밀도가 온도가 상승함에 따라 감소하는 것을 의미한다. 고온에서 병렬 동작 시 LAST는 좋은 전류 균형 특성을 가짐을 기대할 수 있다.

그림 4는 LAST와 LIGBT의 온도에 따른 측정된 순방향 전류-전압 특성이다.

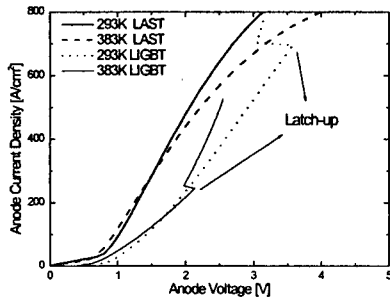


그림 4. 온도에 따른 측정된 LAST와 LIGBT의 순방향 전류-전압 특성 비교

LIGBT는 303 K에서 670 A/cm²에서, 383 K에서 220 A/cm²에서 기생 사이리스터에 의하여 발생하는 래치-업이 일어나는 전류 밀도가 크게 감소하지만, LAST는 온도가 상승함에 따라 훌륭한 전류 포화 특성을 보인다. 이는 LAST가 개선된 열적 FB-SOA를 가짐을 의미한다.

그림 5는 애노드 전류 밀도 20 A/cm²와 100 A/cm²에서 온도에 따른 측정된 LAST의 순방향 전압 강하를 나타낸 그림이다.

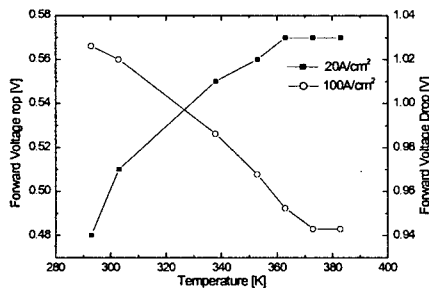


그림 5. 온도에 따른 측정된 애노드 전류 밀도 20 A/cm²와 100 A/cm²일 때 LAST의 순방향 전압 강하

20 A/cm²일 때 온도가 상승함에 따라 격자 산란이 우세해지므로 순방향 전압 강하는 감소한다. 그러나 100 A/cm²일 때 온도가 상승함에 따라 소수 캐리어의 바이폴라 동작이 우세해지므로 순방향 전압 강하는 증가한다. 일반적으로 100 A/cm²와 200 A/cm² 사이에서 LAST는 순방향 전압 강하에서 고온 동작의 적합한 장점을 가진다.

그림 6은 온도에 따른 측정된 사이리스터의 포화 전류 밀도와 턴-온 전압을 나타낸 것이다.

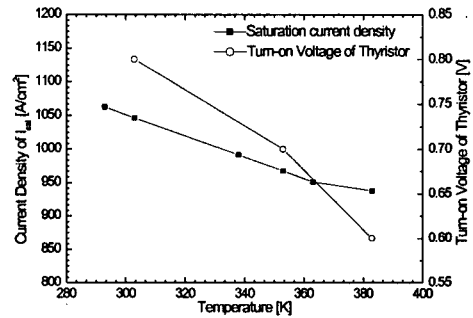


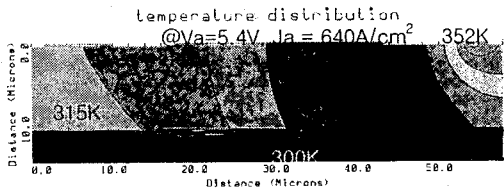
그림 6. 온도에 따른 측정된 사이리스터의 포화 전류 밀도와 턴-온 전압

높은 전류 밀도의 포화 전류 레벨은 애노드에 집적된 MOSFET 아래의 표면 산란에 의하여 온도가 상승함에 따라 감소하게 된다. 포화 전류 밀도의 음의 온도 계수 (negative temperature coefficient)는 온도가 상승해도 필라멘테이션(filamentation)으로 인한 소자 파괴 없이 병렬 동작을 가능하게 한다. 한편 사이리스터의 턴-온 전압은 온도가 상승함에 따라 에너지 밴드-갭이 감소하여 더 낮은 전압에서 p-베이스와 n+ 캐소드의 접합이 턴-온 되므로 감소하게 된다.

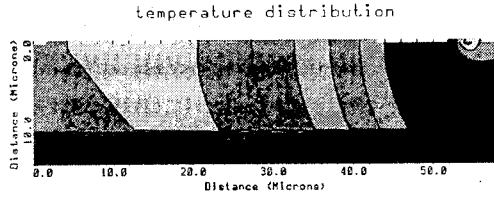
Self-heating을 고려한 수치 해석 시뮬레이터 MEDICI와 ISE를 통하여 LAST의 온도 특성을 검증하였다. 그림 7은 외부 온도가 300 K와 400 K에서 각각 MEDICI와 ISE를 통하여 분석한 온도 분포이다. 사이리스터의 정공 전류와 같은 양의 큰 전류 밀도의 전자 전류로 인해 애노드 게이트 채널에서 가장 높은 온도를 나타낸다. 이는 고온에서 LAST의 포화 전류 밀도가 감소하는 실험 결과를 설명해준다. 애노드 게이트 아래의 채널의 격자 산란은 포화 전류 밀도 감소에 가장 중요한 요소이다. MEDICI와 ISE 결과가 같음을 확인할 수 있다.

그림 8은 LAST의 온도에 따른 MEDICI 시뮬레이션 전류-전압 특성이다. 포화 전류 밀도는 온도가 상승함에 따라 감소되었다. 측정된 실험결과와 일치함을 확인할 수 있다.

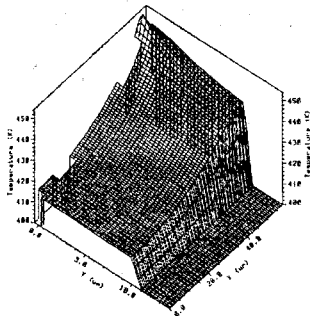
그림 9는 MEDICI를 이용한 애노드 게이트 아래 소자 내 최고 온도를 순방향 전류-전압 특성에 나타낸 그림이다. LAST의 전류 밀도 200 A/cm²까지 온도 편차는 단지 3 K (300 K의 1%) 밖에 되지 않지만, 높은 포화 전류가 흐를 때의 애노드 게이트 아래 온도가 540 K이다.



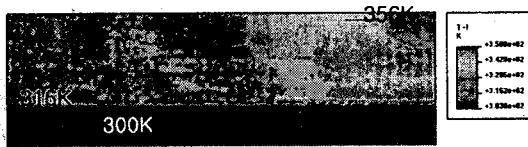
(a)



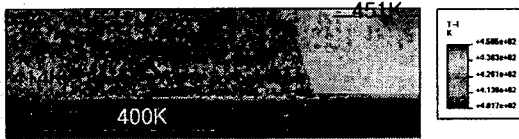
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 7. 외부 온도 (a) 300 K (b) 400 K에서 LAST의 온도 분포 (c) 3차원 온도 분포 (각각 MEDICI 결과), (d) 300 K (e) 400 K에서 LAST의 온도 분포 (각각 ISE 결과)

3. 결론

고온에서 LAST의 전류-전압 특성을 분석하였다. LAST는 고온에서도 훌륭한 전류 포화 특성을 가져 개선된 열적 FB-SOA를 나타내었다. LAST의 100 A/cm²에서의 순방향 전압 강하는 고온에서 개선되었다. LAST는 온도가 상승함에 따라 포화 전류가 감소함에 따라 병렬연결 동작 시 좋은 전류 균형 특성을 획득하였다. 수치 해석 시뮬레이터 ISE와 MEDICI의 열적 모델을 이용하여 온도 특성을 시뮬레이션 하였다. 순방향 전류-전압 특성에 온도가 미치는 영향이 실험과 시뮬레이션이 일치함을 확인하였다.

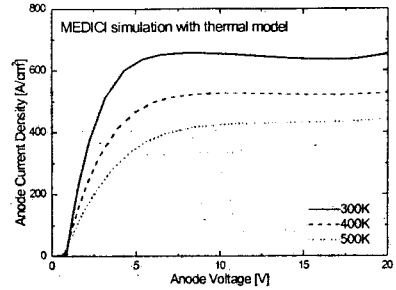


그림 8. MEDICI를 이용한 LAST의 온도에 따른 순방향 전류-전압 특성

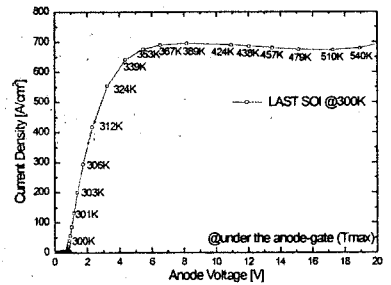


그림 9. MEDICI를 이용한 LAST의 애노드-게이트 아래 온도

감사의 글

본 연구는 한국 과학기술부 후원 전력용반도체 기술 개발사업으로 수행되었다.

[참고 문헌]

- Baliga, B. J. "The MOS-Gated Emitter Switched Thyristor", IEEE Electron Device Letters, 2, 75-77, 1990
- Baliga, B. J., Yih-Shan Huang, "Lateral Junction-Isolated Emitter Thyristor", IEEE Electron Device Letters, 12, 615-617, 1992
- You-Sang Lee, Soo-Seong Kim, Yearn-Ik Choi, Min-Koo Han, "A New Lateral Conductivity Modulated Thyristor With Current Saturation and Low Turn-off Time", Proc. ISPSD'02, 84-88, 2002
- Flores D. et al. "The IBMCT : A Novel MOS-Gated Thyristor Structure", IEEE Electron Device Letters, 1, 10-12, 1997