

4.5kV/1.5kA급 IGCT 설계 및 특성분석

김형우, 김상철, 서길수, 김은동
한국전기연구원 전력반도체연구그룹

Design of 4.5kV/1.5kA IGCT

Kim Hyoung Woo, Kim Sang Cheol, Seo Kil Su, and Kim Eun Dong
Power Semiconductor Group, KERI

Abstract

In this paper, we designed 4.5kV/1.5kA IGCT devices. GCT thyristor has many superior characteristics compared with GTO thyristor, for examples; snubberless turn-off capability, short storage time, high turn-on capability, small turn-off gate charge and low total power loss of the application system containing device and peripheral parts such as anode reactor and snubber capacitance. In this paper we designed GCT thyristor devices, and analyzed static and dynamic characteristics of GCT thyristor depending on the minority carrier lifetime, n-base thickness and doping concentration of n-base region, respectively. Especially, turn-on and turn-off characteristics are very important characteristics for GCT thyristor devices. So, we considered above characteristic for design and analysis of GCT devices.

Key Words : IGCT, Breakdown voltage, turn-off

1. 서 론

전력반도체 소자는 개별소자, 모듈형소자, 지능형 모듈, 스마트 파워 IC로 분류되며, 대용량화(고전압, 대변류), 고주파화 고기능화가 연구개발 추세이다. 소용량에서는 스마트 파워 IC화, 중용량화에서는 지능형 모듈화가 빠르게 진행되고 있으며, 중·대용량 소자에서는 고전압, 대전류 및 고주파화를 위한 저손실 신구조 소자가 제안되고 있다.

GCT 소자는 대전력 에너지 전환분야에 사용되는 전력반도체 소자로 스위칭 능력, 신뢰성, 효율, 그리고 시스템 장착 용이성 등에서 많은 진보된 기술을 가지고 있다. GCT 소자는 종래의 GTO 사이리스터 소자에 비해 축적시간이 10% 정도에 불과하여 고속 스위칭 화가 가능하며 또한 스위칭시간의 편차가 작아서 턴-오프시의 GCT 소자 간의 불균형이 억제되어 직병렬접속이 용이하다. 또한 GTO 사이리스터에서 사용하는 dv/dt 억제용 스너버회로를 없애도 턴-오프가 가능하여 회로 손실이 줄어든다.[1-3]

낮은 스위칭 손실로 인해 GCT 소자는 응용적인 측면에서 여러 가지 유리한 측면을 가지고 있는데, 최종 제품의 요구조건에 맞추어 스위칭 속도를 선택할 수가 있기 때문에 응용의 폭이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. 또한 GCT 소자의 경우 GTO 등과 같은 일반적인 대용량 소자에 비해 4배 정도의 빠른 스위칭 속도를 가지고 있어, 시스템의 효율을 향상시키기 위한 빠른 스위칭이 가능하고 시스템의 크기가 작아진다는 장점이 있다.

이러한 장점으로 GCT 사이리스터 소자는 유연송전(FACTS), 고속전철 및 HVDC 분야에서 응용분야를 점점 넓혀 갈 것으로 예상된다.

본 논문에서는 4.5kV/1.5kA급 GCT 소자의 정상상태 및 과도상태 특성을 소수 전송자 수명, 불순물 도핑 밀도 그리고 n-buffer 층의 두께에 따라 알아보았다. 이러한 소자 특성을 반도체 소자 시뮬레이션 S/W인 Silvaco사의 ATLAS 및 ATHENA를 사용하여 검증하였다.[4]

2. 본 론

2.1 소자 구조

그림 1에 simulation에 사용된 GCT 소자의 단면 구조 및 도핑농도 분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Punch-through 형태의 GCT 소자를 형성하기 위해 n-buffer를 GCT 소자의 애노드쪽에 형성하였다.

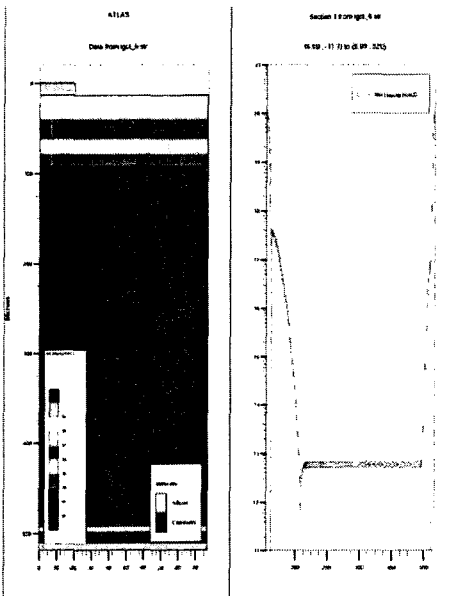


그림 1. Simulation에 사용된 GCT 소자의 구조 및 도핑농도 분포.

4.5kV의 항복전압을 얻기 위해 n-베이스 영역의 농도 및 폭은 $6 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 와 $380\mu\text{m}$ 를 사용하였다. 또한 p-베이스 영역의 peak 농도는 3×10^{17} 을 사용하였다. 표 1에 simulation에 사용된 소자의 설계변수를 나타내었다. 6×10^{12}

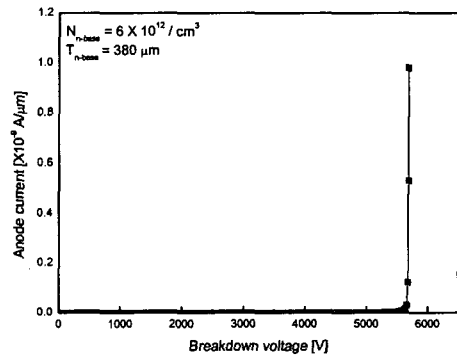
표 1. Simulation에 사용된 설계변수.

| | 농도 ($/\text{cm}^3$) | 두께 (μm) |
|------------|-----------------------|----------------------|
| n+ emitter | 1×10^{20} | 13 |
| p-base | 3×10^{17} | 100 |
| n-base | 6×10^{12} | 380 |
| n-buffer | 3×10^{17} | 20 |
| p+ anode | 1×10^{20} | 5 |

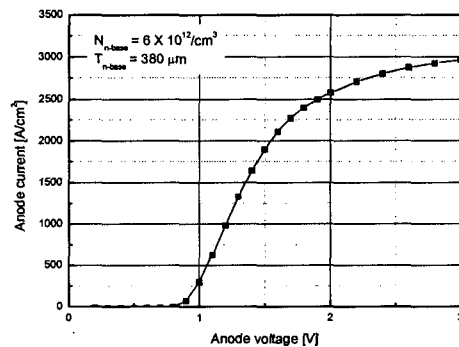
2.2 Simulation 결과 및 분석

GCT 소자의 항복전압 및 순방향 특성과 스위칭 특성을 이차원 소자 simulator인 ATLAS를 이용해 검증하였다.

그림 2에 본 연구에서 사용된 GCT 소자의 항복전압 및 순방향 전도특성을 나타내었다. 일반적인 NPT(Non Punch-through) 형태의 소자에 비해 PT 형태의 소자는 n-buffer 층을 도입함으로써 n-베이스 영역에서의 전계분포를 사다리꼴로 형성하므로 n-베이스 영역의 두께를 줄일 수 있어, 낮은 순방향 전압 강하를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 N-베이스 영역의 농도가 $6 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 이고 두께가 $380\mu\text{m}$ 일때 5600V의 항복전압을 얻을 수 있었다. 일반적으로 고전압 소자의 경우 이론적으로 계산된 항복전압에 비해 실제



(a) GCT 소자의 항복전압 특성



(b) GCT 소자의 순방향 전도특성

그림 2 4.5kV GCT 소자의 항복전압 및 순방향 전도특성.

소자의 항복전압은 소자의 junction termination 구조에 따라 80~90% 정도의 값을 나타내게 된다.

따라서 본 소자의 경우 simulation 결과 5600V의 항복전압을 얻었기 때문에 실제에 있어서도 off 상태의 반복전압 4.5kV는 충분히 넘을 것으로 예상된다. 소자의 순방향 전압강하의 경우 항복전압 simulation에 사용된 것과 동일한 베이스 농도 및 두께를 사용하여 simulation한 결과 약 1.4V 정도를 얻을 수 있었다.

소자의 소수 전송자 수명의 변화에 따른 turn-off 특성을 알아보기 위해 n-type 전송자의 수명을 1 μ s로 고정시키고 p-type 전송자의 수명을 1, 5 그리고 10 μ s로 변경시켜가며 simulation을 수행하였다. 그림 3에 turn-off simulation에 사용된 회로도도 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시된 부분이 gate 구동회로이며 simulation시에는 별도의 회로를 구성하여 simulation하였다.

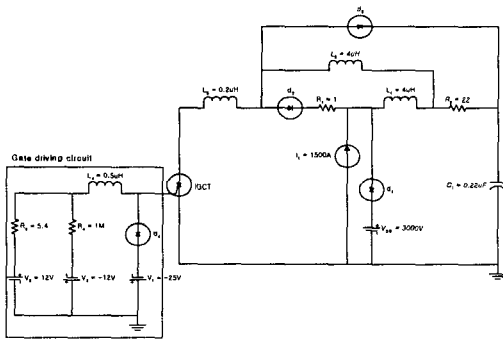


그림 3. Turn-off simulation에 사용된 회로도.

그림 4에 GCT의 turn-off시 전송자 수명에 따른 anode 전류의 변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 전송자 수명이 커질수록 turn-off시의 축적 시간이나 전류 tail이 길어지는 것을 알 수 있다. 이는 순방향에서 p+ anode로부터 주입된 정공들의 수명이 길어진 데 따른 것으로 소자가 on 상태에서 off 상태로 전환될 경우, 정공들이 off와 동시에 소멸되지 않고 재결합을 통해 서서히 사라지기 때문이다. Simulation 결과 소자의 turn-off 축적시간은 소수 전송자 수명을 1 μ s에서 10 μ s까지 변화시켰을 때 대략 4 ~ 22 μ s 정도를 나타내었다.

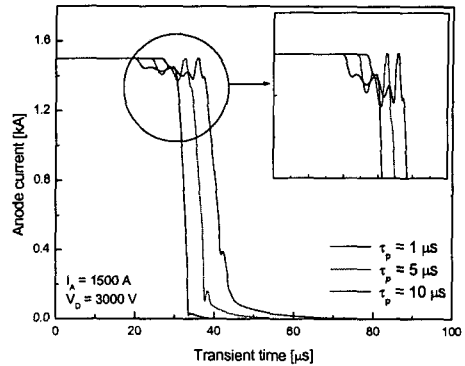


그림 4. 전송자 수명에 따른 anode 전류특성변화.

그림 5에 turn-off시 전송자의 수명 변화에 따른 anode 전압의 변화를 나타내었다. Anode 전압의 변화곡선을 살펴보면 off시에 voltage overshoot이 일어나는 것을 볼 수 있으며, 전송자의 수명이 길어질수록 overshoot되는 voltage의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 일반적으로 전송자 수명이 긴 경우에는 high-level injection에 의해 높아진 n-베이스 영역의 농도가 본래의 농도로 돌아가는데 걸리는 시간이 더 많이 걸리게 되며, n-베이스 영역의 비저항의 변화도 상대적으로 천천히 진행되게 된다. 따라서 GCT에 흐르는 전류에 따른 전압의 변화도 역시 느리게 진행되기 때문에 전송자 수명이 짧은 경우에 비해 voltage overshoot이 작게 나타나게 된다.

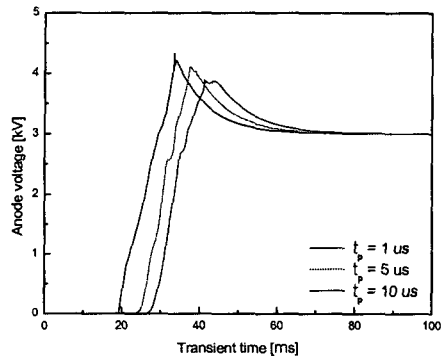


그림 5. 전송자 수명에 따른 anode 전압특성변화.

3. 결 론

본 논문에서는 4.5kV/1.5kA급 GCT 소자의 항복 전압 특성 및 스위칭 특성에 대해 알아보았다. GCT 소자의 항복전압 특성을 simulation 한 결과 순방향 전압 강하는 약 1.4V를 얻을 수 있었고, 항복전압은 n-베이스 폭이 380 μ m, 농도가 $6 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 일때 5600V를 얻을 수 있었다.

소주 전송자 수명에 따른 turn-off 특성을 simulation한 결과 소주 전송자 수명에 따른 turn-off 축적시간은 대략 4 μ s에서 22 μ s까지 변하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 중점국가연구개발사업의 전력용 반도체 기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] E. Carrol et al., "IGCT Thyristor : A new approach to superpowerful electronics", Russian electrical Engineering, Vol. 69, No. 7, pp. 54-63, 1998.
- [2] Satoh et al., "A new high power device GCT(Gate Commutated Turn-off) Thyristor", EPE, 1997.
- [3] H. Iwamoto et al., "High power semiconductor device : a symmetric gate commutated turn-off thyristor", IEE, Proc, Electr. Power Appl., 2001.
- [4] Silvaco TCAD Manuals, Atlas, Silvaco International, Co. USA.