

## 대용량 IGCT 소자의 정상상태 및 과도상태 특성 해석

김상철, 김형우, 김은동  
한국전기연구원 전력반도체그룹

### Static and Transient Simulation of High Power IGCT Devices

Sang-Cheol Kim, Hyung-Woo Kim, Eun-Dong Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

#### Abstract

Recently a new high power device GCT (Gate Commutated Turn-off) thyristor has been successfully introduced to high power converting application areas. GCT thyristor has a quite different turn-off mechanism to the GTO thyristor. All main current during turn-off operation is commutated to the gate. Therefore, IGCT thyristor has many superior characteristics compared with GTO thyristor; especially, snubberless turn-off capability and higher turn-on capability. The basic structure of the GCT thyristor is same as that of the GTO thyristor. This makes the blocking voltage higher and controllable on-state current higher. The turn-off characteristic of the GCT thyristor is influenced by the minority carrier lifetime and the performance of the gate drive unit. In this paper, we present turn-off characteristics of the 2.5kV PT(Punch-Through) type GCT as a function of the minority carrier lifetime and variation of the doping profile shape of p-base region.

**Key Words** : IGCT, Punch-Through, Dynamic characteristic

#### 1. 서론

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, 단가 그리고 시스템 장착 용이성 등에서 많은 진보된 기술을 가지고 있다. GCT 소자는 종래의 GTO사이리스터 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  $dv/dt$  억

제용 스너버회로를 없애도 턴-오프가 가능하여 회로 손실이 줄어든다. 즉 GCT 소자는 스너버회로 및 애노드 reactor에 의해 발생하는 손실이 대폭 억제되므로 동일조건에서 GTO사이리스터에 비해서 손실이 약 40% 정도로 작아진다. [1-3]

스위칭 손실이 적다는 것은 응용의 측면에서 매우 유리한데, 최종 제품의 요구조건에 맞게 최적의 스위칭 속도를 선택할 수 있으므로 응용의 폭이 넓어진다. GCT 소자의 경우 일반적인 대용량 전력반도체의 스위칭 속도에 비해 약 4배 정도 빠른 1kHz의 구동이 가능하다. 즉 시스템의 효율을 올리기 위해 빠른 스위칭이 가능해지며 시스템의 크기도 작아지는 장점이 있다.

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

본 논문에서는 2.5kV급 GCT 소자의 정상상태

및 과도상태 특성을 소수 전송자 수명, 불순물 도핑 밀도 그리고 n-buffer 층의 두께에 따라 알아 보았다. 이러한 소자 특성을 반도체 소자 시뮬레이션 S/W인 Silvaco사의 ATLAS 및 ATHENA를 사용하여 검증하였다.[4]

2. 소자 구조

그림 1과 그림 2에 본 연구에서 고려하는 GCT 소자의 단면구조와 벌크방향으로의 도핑농도 분포를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 PT-type의 GCT 소자를 형성시키기 위해 n-buffer를 GCT의 에노드쪽에 형성하였다.

n-buffer 층의 개념은 GTO 사이리스터에서 단락 에노드구조 (shorted anode)와 결합되어 높은 트리거전류를 유발하고 유지전류가 높아지는 단점이 있어 적용되지 못하였다. 또한 GTO사이리스터 소자와 다이오드사 하나의 칩에 결합되었을때 다이오드의 성능 저하가 GTO 사이리스터의 성능 저하에 비하여 현저하게 크게 나타난다. 그러나 ABB사에서 얇고 높게 도핑된 p-형의 투명 에노드구조(transparent anode)를 n-buffer 층 위에 형성하여 이러한 단점을 극복한 후 GCT 소자에 적용되어 트리거 전류를 일반 GTO 사이리스터 소자에 비해 크게 줄일 수 있게 되었다.

2.5kV의 고전압을 견디기 위한 n-베이스 영역의 두께 및 도핑농도는 각각  $380\mu\text{m}$ 와  $1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 이다. 또한 p-베이스의 피크농도는  $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 으로 설계되었다. 표 1에 본 연구에서 고려하는 GCT 소자의 구조변수를 나타내었다.

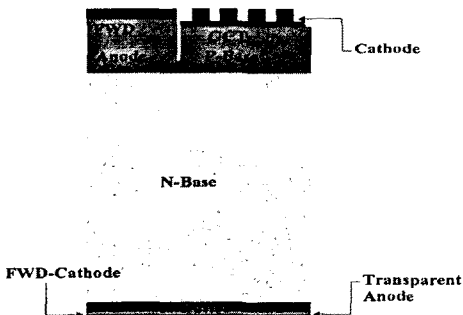


그림 1. 시뮬레이션에서 고려하는 GCT 소자의 단면구조

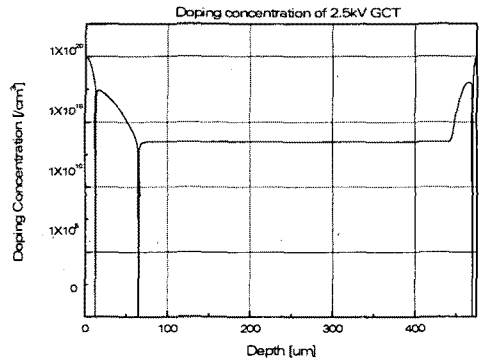


그림 2. 2.5kV급 GCT 시뮬레이션 소자의 불순물 분포

표 1. Simulation에 사용된 설계 변수

	Concentration (cm <sup>-3</sup> )	Thickness (μm)
n+ emitter	$1 \times 10^{20}$	13
p-base	$5 \times 10^{17}$	65
n-base	$1 \times 10^{13}$	380
n-buffer	$5 \times 10^{17}$	20
p+ anode	$1 \times 10^{20}$	5

3. Simulation results and Discussion

GCT 소자의 정상상태 및 스위칭 상태 시뮬레이션을 Silvaco사의 소자 시뮬레이터인 ATLAS와 공정 시뮬레이터인 ATHENA를 사용하여 수행하였다.

그림 3에 본 연구에서 고려하는 GCT소자의 항복전압 특성을 나타내었다. 일반적인 NPT-type (Non-Punch-Through)의 소자에 비하여 PT-type 소자는 n-buffer 층을 도입함으로써 n-base 층에서의 전계분포를 사다리꼴로 형성시키므로 n-base 층의 두께를 크게 감소시킬 수 있다. N-base 층의 폭이  $380\mu\text{m}$ 이고 불순물 농도가  $1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$  일때 3500V 이상의 항복전압을 얻었다. 일반적으로 고전압소자의 경우 이론적으로 계산된 항복전압에 비해 실제 소자의 항복전압은 고전압 터미네이션 구조에 따라 80~90% 정도의 값을 보인다. 따라서

본 소자의 경우 오프-상태 반복전압  $V_{DRM}$ 이 2.5kV는 충분히 넘을 것으로 예상할 수 있다.

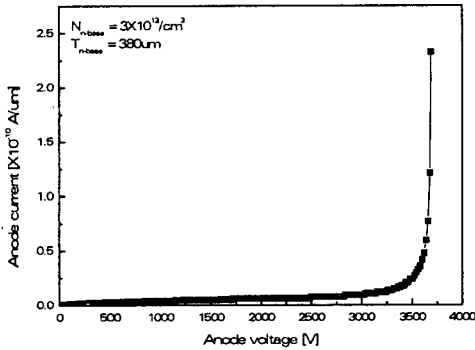


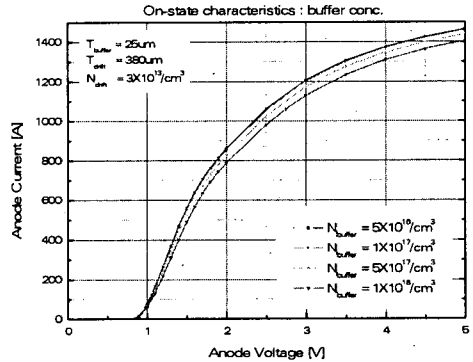
그림 3. 2.5kV급 GCT 소자의 항복전압 simulation 결과

그림 4의 (a)와 (b)에 도핑농도와 n-buffer 층의 두께를 변화시키면서 소자의 순방향 특성을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 n-buffer 층의 두께와 도핑농도가 증가할 수록 GCT 소자의 순방향 전압강하가 커지는 것을 알 수 있다. n-buffer 층 농도를  $5 \times 10^{16}/cm^3$ 에서  $1 \times 10^{18}/cm^3$ 로 증가시키면 에노드 전류가 500A에서 순방향 전압강하는 1.35V에서 1.5V로 약 0.15V정도 증가되며 n-buffer 층의 두께를 15 $\mu m$ 에서 40 $\mu m$ 로 증가시킬 경우 에노드 전류가 500A에서 순방향 전압강하가 1.4V에서 1.63V로 약 0.23V 정도 증가됨을 알 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 본 연구에서 목표로 하는 500A에서 순방향 전압강하를 1.5V를 얻기 위해 n-buffer 층의 농도 및 두께를 각각  $3 \times 10^{17}/cm^3$  및 20 $\mu m$ 로 결정하였다.

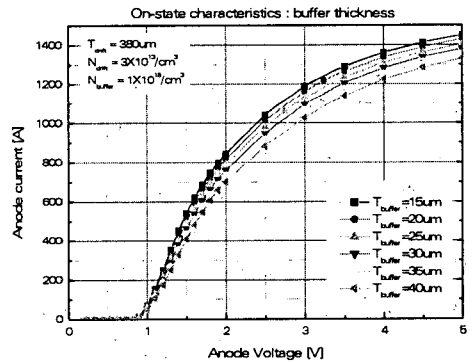
그림 5에 소수 전송자 수명( $\tau_p$ )의 변화에 따른 GCT 소자의 턴-오프 파형을 나타내었다. 그림에서 소수 전송자 수명을 1 $\mu s$ 에서 20 $\mu s$ 로 변화시키면서 턴-오프 시뮬레이션을 수행하였으며 이때 스위칭 되는 전류는 스너버회로가 없는 조건에서 500A이다.

그림에서 볼 수 있듯이 소수 전송자의 수명  $\tau_p = 1 \mu s$ 에서 피크 스파이크 전압  $V_p$ 는 2,450V이고  $\tau_p = 20 \mu s$ 에서  $V_p$ 는 2,325V이며 이때의 회로

에 인가되는 DC bus 전압은 2000V이다. 이러한 스파이크 전압은 소자에 병렬로 스너버회로를 구성하게 되면 없어진다.



(a)



(b)

그림 4. 2.5kV급 GCT 소자의 온-상태 전압강하 (a) n-buffer 농도 변화 (b) n-buffer 두께

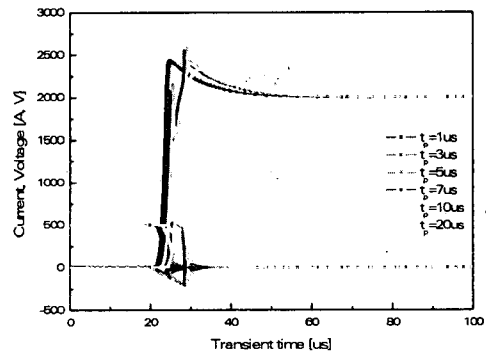


그림 5. 소수 전송자 수명에 따른 2500V급 GCT 소자의 턴-오프 파형

또한 이때 소자에서의 턴-오프 축적시간( $t_{stg}$ )은 소수 전송자의 수명  $\tau_p = 1\mu s$ 일 때  $1.8\mu s$  이고  $\tau_p = 20\mu s$  일 때  $6.6\mu s$ 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 소수 전송자 수명이  $5\mu s$  보다 커질 경우 높은 전류 오버슛이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 높은 전류 오버슛을 줄이기 위해서는 소수 전송자 수명을  $5\mu s$ 보다 작게 만들어 주어야 한다. 그러나 소수 전송자 수명이 작아질 경우 소자의 턴-오프 시간이 줄어 들고 전류 오버슛이 감소하는 대신 소자의 온-상태 전압강하가 커지게 되므로 소자 설계시 소수 전송자 수명에 따른 턴-오프 시감 및 전류 오버슛과 온-상태 전압강하 사이의 관계를 고려하여 설계하여야 한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 2.5kV/1.5kA급 GCT 소자의 정적 및 동적 특성에 대해 알아보았다. GCT의 정적인 특성을 시뮬레이션 한 결과 순방향 전압 강하는 소자의 소수 전송자 수명에 따라 1.3V에서 6.5V까지 변하는 것을 알 수 있었고, 항복전압의 경우 N-bqse 층의 폭이  $380\mu m$ 이고 불순물 농도가  $1 \times 10^{13}/cm^3$  일때 3500V 이상의 항복전압을 얻을 수 있었다. 또한 동적인 특성을 알아보기 위해 소수 전송자 수명  $\tau_p$  를  $1\mu s$ 에서  $20\mu s$ 까지 변화 시켜가며 턴-오프 특성을 알아본 결과 소수 전송자 수명에 따른 턴-오프 축적시간은  $1.8\mu s$ 에서  $6.6\mu s$ 까지 변하는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] E. Carroll et al., "IGCT Thyristors : 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] K. Kurachi et. al., "GCT Thyristor - a novel approach to high power conversion", POWER CONVERSION Proc., May 1998
- [5] Silvaco TCAD Manuals, Atlas, Silvaco International, Co. USA