

고속전철용 고전압 IGCT 소자의 전기적 특성

김상철, 서길수, 김형우, 김은동
한국전기연구원, 전력반도체그룹

Electrical Characteristics of High Voltage IGCT Devices for Rapid Electronic Railway

Kim Sang-Cheol, Seo Kil-Soo, Kim Hyong-Woo, Kim Eun-Dong
Korea Electrotechnology Research Institute, Power Semiconductor Group

Abstract - IGCT devices is a superior devices for power conversion purpose. The basic structure of the IGCT devices is same as that of GTO thyristor. This makes the blocking voltage higher and controllable on-state current higher. In this paper, we present static and dynamic characteristics of 4.5 kV PT-type IGCT devices as a function of minority carrier lifetime, n-base thickness and n-buffer thickness. We should choose proper structural parameters for good electrical characteristics of GCT devices.

1. 서 론

미국의 GE사에서 1950년대 전력시스템에서 스위치 소자로 사용되던 사이라트론을 대체하기 위한 목적으로 반도체 제어 정류기 (Semiconductor Controlled Rectifier, SCR)라는 새로운 반도체 소자를 개발한 이래 지난 50여년간 전력전자 분야에서 스위칭소자로서 중요한 역할을 수행하고 있다.

1980년대에 들어 전력반도체소자에 각각의 개별반도체의 장점을 살린 신구조의 전력반도체소자가 개발됨으로써 획기적인 진척이 이루어졌다. 절연게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT)소자는 BJT의 높은 전압저지능력 및 전류취급능력에 MOSFET 소자의 편리한 구동성 등의 장점을 합하여 빠른 속도로 중용량 응용분야에서 BJT 소자를 대체하고 있으며 지속적인 연구개발로 대용량 분야에서도 시장을 확대하고 있는 실정이다. 그러나 높은 전압저지능력 및 대전류 취급능력을 갖기 위해서는 IGBT 소자를 직접 연결해야 하고, 이 경우 온-상태 손실이 커져 소자의 온도가 급격히 상승하게 되고 따라서 안전동작영역이 줄어들게 되어 아직은 대용량 분야에서 확실한 경쟁력을 확보하지 못한 실정이다.

따라서 최근에는 대전력 응용분야에서 기본적인 사이리스터 소자의 골격을 유지하면서 기능적 또는 구조적인 변경을 통해 MCT(MOS Controlled Thyristor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) 및 SITH (Static Induction Thyristor) 등의 새로운 소자들이 생산되고 있다.

본 연구에서는 현재 고속전철 및 대용량 모터구동에서 응용이 확대되고 있는 4.5kV급 IGCT 소자의 설계를 위해 수치해석적인 방법을 사용하여 소자의 스위칭 특성을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 4.5kV급 IGCT 소자 구조 및 정상상태 특성

그림 1에 본 연구에서 고려하는 GCT 소자의 2차원 단면구조와 소자의 수직방향으로의 불순물 분포를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 펀치-스로우 (PT-type)의 GCT 소자를 형성시키기 위해 n-버퍼층

을 GCT의 에노드쪽에 형성하였다. 고전압소자의 경우 Non-Punch Through 구조를 사용할 경우 원하는 항복전압을 얻기 위해서는 n-베이스 영역이 지나치게 두꺼워지기 때문에 온-전압이 커지고 턴-오프시 전력손실도 따라서 커지게 된다. 4.5kV 정도의 고전압을 견디기 위해서는 n-베이스의 불순물 농도가 10^{12} 에서 10^{13}cm^{-3} 정도가 되어야 한다. 본 연구에서는 4.5kV 이상의 항복전압을 얻기 위해 PT 구조를 채용하였으며 이때의 n-base의 비저항은 216 Ωcm , 두께는 450 μm 로 하였다. 이러한 조건에서 계산된 항복전압은 약 6.2kV 정도이며 계산에 의해 예측되는 결과는 5.2kV 정도이다. 아래의 그림 2에 n-베이스의 두께를 350 μm 에서 450 μm 까지 변화시키며 항복전압 변화를 simulation한 결과를 나타내었다.

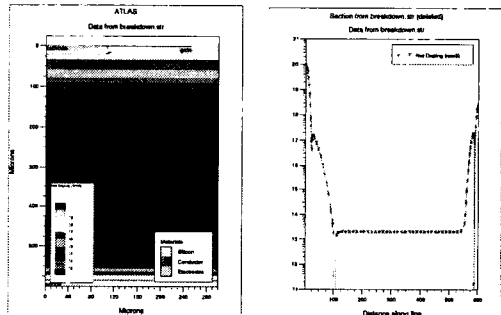


그림 1. (a) 4.5kV급 GCT소자의 2차원 수직단면도, (b) 수직방향으로의 불순물분포

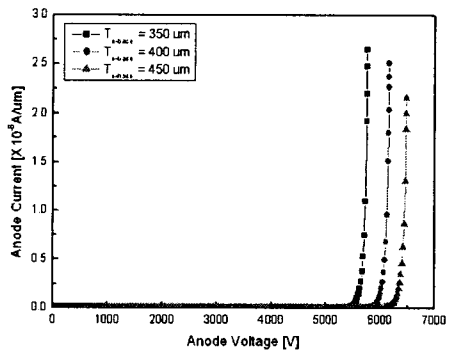
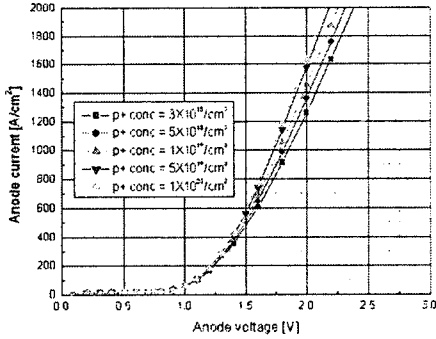


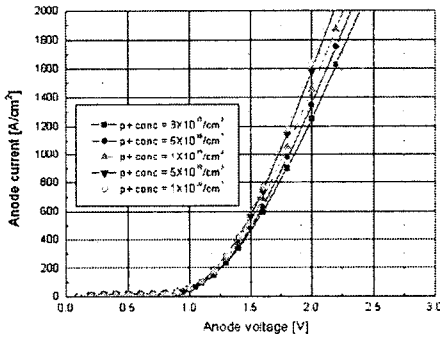
그림 2. n-base 두께에 따른 항복전압 변화.

그림 3에 PT구조 IGCT의 n-버퍼층의 두께를 20 μm 및 25 μm 로 하였을 때 p+ 에노드 영역의 농도에 따른 순방향 전류-전압 특성의 변화를 simulation한 결과를 나타내었다. p+ 에노드의 농도는 $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 에서

$1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 까지 변화시켜가며 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 p+ 애노드의 농도가 증가할수록 p+ 애노드에서 n-베이스 영역으로 주입되어지는 정공전송자의 농도가 증가하기 때문에 온-상태 전압 강하의 값이 전류밀도가 $1500\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 2.1V에서 1.7V까지 감소함을 알 수 있으며, 버퍼의 두께는 순방향 전류-전압 특성에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. GCT 소자의 순방향 전류-전압 특성 (a)n-buffer 두께 $20\mu\text{m}$, (b) n-buffer 두께 $25\mu\text{m}$

그림 4에 정공의 수명 변화에 따른 IGCT 소자의 전류-전압 특성의 변화를 나타낸 것이다. 전자의 수명은 $1\mu\text{s}$ 로 고정된 후 정공의 수명만 $1\mu\text{s} \sim 10\mu\text{s}$ 까지 변화시켜가며 simulation을 수행하였다. 이때 버퍼의 농도 및 두께는 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, $20\mu\text{m}$ 를 사용하였으며, p+ 애노드의 농도는 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 를 사용하였다. 일반적으로 버퍼 영역을 사용하는 PT 구조의 소자에서는 소수 전송자의 수명이 길어질수록 온-전압 특성이 좋아지게 되며, 이것은 소수 전송자의 수명이 길어짐에 따라 버퍼 영역에서 재결합되지 않고 베이스 영역에 도달하는 소수 전송자의 수가 많아지기 때문이다. Simulation 결과에서도 정공의 수명이 $7\mu\text{s}$ 이상인 경우에 만족할만한 온-전압을 얻을 수 있음을 확인하였으며, 수명이 $5\mu\text{s}$ 이하인 경우 p+ 애노드에서 주입된 정공의 대부분이 버퍼 영역에서 재결합되어 사라지기 때문에 원하는 온-전압 특성을 얻을 수가 없었다.

따라서 소자 제작시에도 소수 전송자인 정공의 수명을 적절한 값으로 조절해야 할 필요성이 있음을 알 수 있었다.

또한 온-전압 특성은 n-베이스 영역의 두께에도 영향을 받는데 n-버퍼층의 농도 및 두께를 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 및 $20\mu\text{m}$ 로 고정하고 n-베이스 영역의 두께를 $350\mu\text{m}$ 에서 $450\mu\text{m}$ 까지 변화하며 simulation 한 결과 n-베이스의 두

께가 증가할 수록 베이스 영역에서의 전압강하가 커지게 되며 전류밀도가 $1500\text{A}/\text{cm}^2$ 인 경우 온-전압이 1.5V에서 1.8V까지 증가하게 되었다.

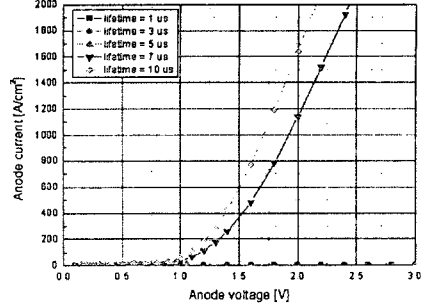


그림 4. 정공의 수명에 따른 GCT소자의 온-전압 특성

2.2 Switching 특성 해석

IGCT 소자는 고속전철에서 모터를 구동하기 위한 전력변환 소자로 빠른 모터 구동을 위해서는 빠른 스위칭 특성이 요구된다. 기본적으로 IGCT소자는 GTO소자에 비해 턴-오프시에 n-베이스에 축적된 과잉전송자를 애노드가 아닌 게이트로 전류시키므로 축적시간이 짧고 오프 시간이 짧은 장점을 가지고 있다.

그림 5에 스위칭 특성 해석을 위한 기본 회로도를 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시된 부분이 게이트 구동 회로이며 simulation시에는 별도의 회로를 구성하여 사용하였다.

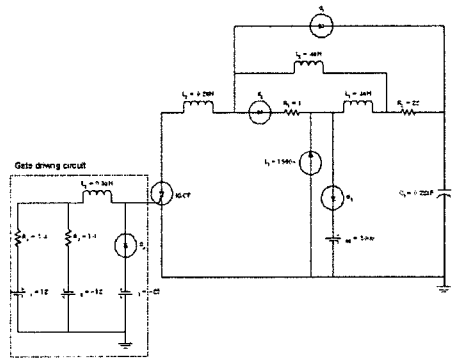


그림 5. IGCT 턴-오프 회로도

Simulation에 사용된 소자의 비저항 및 두께는 $216\Omega\text{-cm}$, $600\mu\text{m}$ 를 사용하였다. 표 1에 simulation에 사용된 소자의 설계 변수를 나타내었다.

전송자 수명의 변화에 따른 IGCT 턴-오프 특성을 알아보기 위하여 전자의 수명은 $1\mu\text{s}$ 로 고정시키고, 정공의 수명을 1, 5, $10\mu\text{s}$ 로 변경시켜가며 simulation을 수행하였다.

표 1. Switching simulation에 사용된 변수

	n+	p-base	n-base	n-buffer	p+
농도 [$/\text{cm}^3$]	1×10^{20}	3×10^{17}	2×10^{13}	3×10^{17}	3×10^{18}
두께 [μm]	20	100	450	25	25

그림 6은 IGCT의 턴-오프시 소수 전송자 수명 변화에 따른 애노드전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서

나타낸 바와 같이 소수 전송자의 수명이 커질수록 턴-오프 시의 축적시간과 테일전류가 길어지는 것을 알 수 있다. 이는 순방향 시에 p+ 애노드로부터 주입된 정공의 수명이 길어질수록 따른 것으로, 소자가 온-상태에서 오프-상태로 전환될 경우, 정공들이 오프와 동시에 소멸되지 않고 재결합을 통해 서서히 사라지기 때문이다.

그림 7에 턴-오프시 전송자수명의 변화에 따른 애노드 전압의 변화를 나타내었다. 애노드 전압의 변화 곡선을 살펴보면 오프시 오버슈트 전압이 일어나는 것을 볼 수 있으며, 전송자의 수명이 커질수록 오버슈트되는 전압의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 일반적으로 전송자 수명이 긴 경우에는 고준위 주입에 의해 높아진 n-베이스의 농도가 본래의 농도로 돌아가는데 걸리는 시간이 더 많이 걸리게 되며, n-베이스의 저항의 변화도 상대적으로 천천히 진행되게 된다. 따라서 IGCT에 흐르는 전류에 따른 전압의 변화도 역시 느리게 진행되기 때문에 전송자 수명이 짧은 경우에 비해 오버슈트 전압이 작게 나타나게 된다.

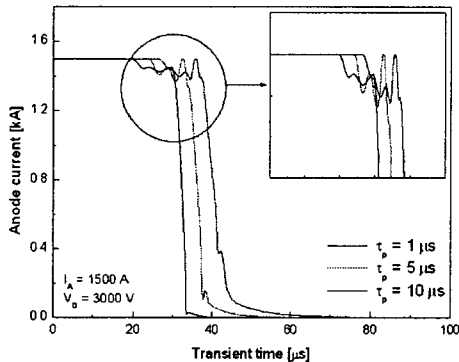


그림 6. 턴-오프시 소수 전송자 수명 변화에 따른 애노드 전류의 변화

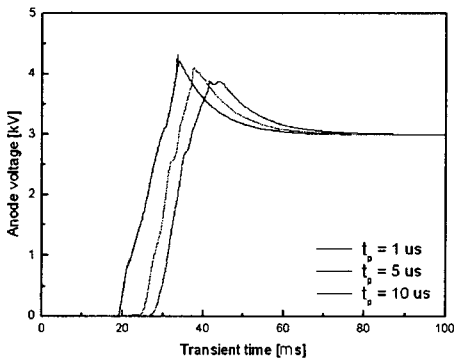


그림 7. 턴-오프시 전송자 수명의 변화에 따른 애노드 전압의 변화

그림 8에 소수 전송자의 수명의 변화에 따른 IGCT 소자의 스위칭 특성을 나타내었다. 그림에서 보면 소수 전송자의 수명이 길어질수록 IGCT의 턴-오프 시간이 길어짐을 알 수 있다. 소수 전송자의 수명이 1 μ s 및 5 μ s인 경우에는 소자의 수명이 20 μ s 이내로 목표로 하는 값을 만족하지만 소수 전송자의 수명이 10 μ s인 경우에는 턴-오프 시간이 20 μ s를 넘어서게 되어 목표로 하는 값을 만족하지 못한다. 또한 전송자 수명이 길어질수록 턴-오프시의 테일 전류가 길어지게 되어 스위칭시의 전력손실이 커지게 된다. 따라서 소자 설계시 소수 전송자 수명을 조절할 경우에는 턴-오프 시간외에도 온-상태 전

압과의 상관관계를 고려하여 조절하여야 함을 알 수 있다.

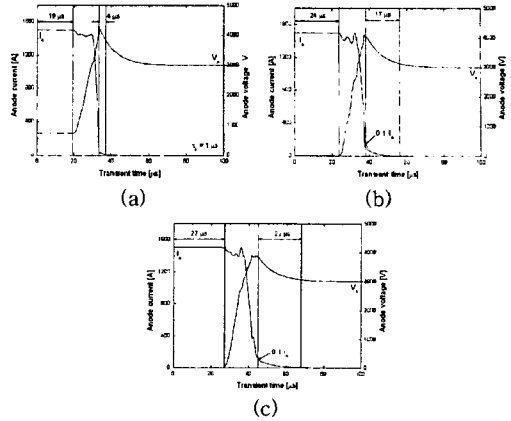


그림 8. 소수 전송자의 수명의 변화에 따른 IGCT 소자의 스위칭 특성 (a) 소수 전송자 수명 = 1 μ s, (b) 소수 전송자 수명 = 5 μ s, (c) 소수 전송자 수명 = 10 μ s

3. 결 론

본 논문에서는 4.5kV급의 고속전철용 IGCT소자의 전기적 특성을 simulation을 통해 알아보았다. IGCT소자의 정적특성 결과는 PT-type의 구조를 채용하고 Si-웨이퍼의 비저항이 216 Ω cm이며 n-base의 두께를 450 μ m로 할 경우 충분히 목표값 이상의 결과를 얻을 수 있었으며 온-상태 전압도 1.8V 정도의 우수한 특성을 얻을 수 있었다. 또한 스위칭 특성을 해석하기 위해 n-베이스에서의 소수 전송자의 수명을 변화시키며 simulation을 수행하였다. 소수 전송자 수명을 1 μ s에서 10 μ s까지 변화시키며 턴-오프 특성을 알아본 결과 턴-오프 시간은 4 μ s에서 22 μ s로 변하며 축적시간은 19 μ s에서 27 μ s까지 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 목표로 하는 턴-오프 특성을 만족시키기 위해서는 소수 전송자의 수명을 5 μ s 이내로 조절하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [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