

2.5kV급 Gate Commutated Thyristor 소자의 제작 특성

김상철, 김형우, 서길수, 김남균, 김은동

한국전기연구원 전력반도체연구그룹

Device characteristics of 2.5kV Gate Commutated Thyristor

Kim Sang Cheol, Kim Hyung Woo, Seo Kil Soo, Kim Nam Kyun, Kim Eun Dong
Power Semiconductor Group, KERI

Abstract

This paper describes the design concept, fabrication process and measuring result of 2.5kV Gate Commutated Thyristor devices. Integrated gate commutated thyristors (IGCTs) is the new power semiconductor device used for high power inverter, converter, static var compensator (SVC) etc. Most of the ordinary GTOs (gate turn-off thyristors) are designed as non-punch-through (NPT) concept; i.e. the electric field is reduced to zero within the N-base region. In this paper, we propose transparent anode structure for fast turn-off characteristics. And also, to reach high breakdown voltage, we used 2-stage bevel structure. Bevel angle is very important for high power devices, such as thyristor structure devices. For cathode topology, we designed 430 cathode fingers. Each finger has designed 200 μ m width and 2600 μ m length. The breakdown voltage between cathode and anode contact of this fabricated GCT device is 2,715V.

Key Words : Gate Commutated Thyristor, Fast Switching, High Power semiconductor

1. 서론

GCT 소자는 대전력 에너지 변환분야에 사용되는 전력반도체 소자로 스위칭 능력, 신뢰성, 효율, 단가 그리고 시스템 장착 용이성 등에서 많은 진보된 기술을 가지고 있다. GCT 소자는 종래의 GTO 사이리스터 소자에 비해 축적시간이 10% 정도에 불과하여 고속 스위칭화가 가능하며 또한 스위칭시간의 편차가 작아서 턴-오프시의 GCT 소자간의 불균형이 억제되어 직병렬접속이 용이하다. 또한 GTO 사이리스터에서 사용하는 dv/dt 억제용 스너버회로를 없애도 턴-오프가 가능하여 회로 손실이 줄어든다. 즉 GCT 소자는 스너버회로 및 애노드 reactor에 의해 발생하는 손실이 대폭 억제되므로 동일조건에서 GTO 사이리스터에 비해서 손실이 약 40% 정도로 작아진다. [1-3]

스위칭 손실이 적다는 것은 응용의 측면에서 매

우 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 다른 분야로 응용분야를 점점 넓혀 갈 것으로 예상된다.

1980년대에 들어 전력반도체소자에 각각의 개별 반도체의 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 전압 지지능력 및 대전류 취급능력을 갖기 위해서는 IGBT 소자를 직·병렬 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.

본 연구에서는 2.5kV급 GCT 소자의 제작을 위한 simulation을 수행하였으며, 실제 제작된 소자의 특성과 비교하였다.

2. 본론

2.1 소자의 구조

그림 1에 본 연구에서 제작한 GCT 소자의 단면 구조를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 PT-type의 GCT 소자를 형성시키기 위해 n-buffer를 GCT의 애노드 쪽에 형성하였다.

n-buffer 층의 개념은 GTO 사이리스터에서 단락 애노드구조 (shorted anode)와 결합되어 높은 트리거전류를 유발하고 유지전류가 높아지는 단점이 있어 적용되지 못하였다. 또한 GTO사이리스터 소자와 다이오드가 하나의 칩에 결합되었을 때 다이오드의 성능 저하가 GTO 사이리스터의 성능 저하에 비하여 현저하게 크게 나타난다. 그러나 ABB사에서 얇고 높게 도핑된 p-형의 투명 애노드 구조(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.

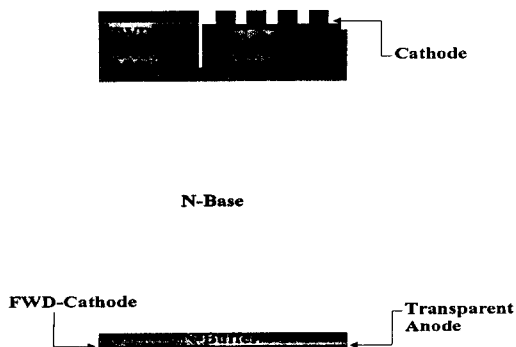


그림 1. 2.5kV급 GCT소자의 단면구조.

또한 GCT소자에는 투명 에미터를 도입하였다. 사이리스터 소자에서 낮은 온-상태 전압을 얻기 위해서는 소자가 전도성 상태로 유지되어야 한다. 즉, 재생 트랜지스터 쌍을 유지한다. 낮은 턴-오프 손실을 위해서는 애노드 트랜지스터의 전류이득이 제한을 받으며 따라서 낮게 도핑어야 한다. 이러한 이유로 턴-오프 때, 전압이 애노드에서 형성되기 시작함으로써, 전자들이 홀의 재주입 없이 에미터를 가로 질러서 소멸될 수 있다. 따라서 얇은 애노드 층을 형성하여 전자가 애노드를 통해서 빠르게 소멸되고, 즉 전자가 보기에 애노드 영역의 두께가 매우 얇아서 마치 투명한 것처럼 느껴진다. 일반적인 GTO 사이리스터에서는 물리적으로 동일한 효과를 얻기 위해서 단락 에미터 구조가 사용되지만 이것은 게이트의 트리거전류의 증가를 초래한다.

2.2 소자 제작 공정

GCT소자의 제작공정은 일반적인 반도체 소자 제작공정과 유사하다. 그러나 2.5kV 이상의 고전압을 견디기 위해서는 깊은 p-베이스가 필요하게 된다. 따라서 동일온도에서 확산계수가 높은 알루미늄 또는 갈륨을 확산원으로 사용한다. 2.5kV 이상의 고전압을 견디기 위해서는 65 μ m의 p-베이스 깊이가 필요하다. 본 실험에서는 1250 $^{\circ}$ C의 온도에서 선확산을 450분 수행하고 후확산 시간을 변화시키면서 확산깊이 조절을 하였다. 아래의 그림 2에 후확산 시간을 변화시키면서 실험한 알루미늄 확산 깊이를 나타내었다. 후확산시간을 700분으로 하였을 때 원하는 깊이의 확산 깊이를 얻을 수 있었다. 이때의 표면 농도는 $4 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 이다.

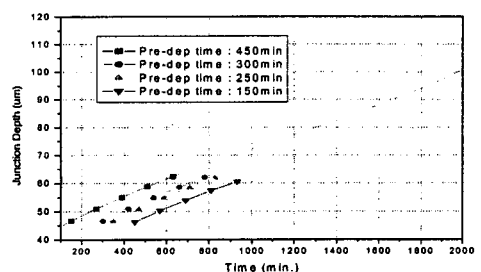


그림 2. 후확산(drive-in)시간에 따른 Al-B 확산 깊이변화.

GCT 소자의 애노드 층의 n-buffer 영역을 형성하기 위하여 POCl_3 를 확산하였다. 확산과정은 선확산과 후확산(drive-in)으로 구별되어 진행하였다. 선확산 공정은 1230°C 의 온도에서 2시간동안 수행하였으며 후확산 공정은 1230°C 의 온도에서 17시간 동안 확산하였다. 후확산 공정의 세부적인 내용은 1230°C 의 온도에서 1시간 동안 건식 산화, 7시간 동안 습식산화, 2시간 동안 건식산화 그리고 마지막으로 7시간 동안 질소 분위기에서 수행하였다. n-buffer 영역의 확산 깊이는 $37\mu\text{m}$ 로 simulation을 통해 예측한 $35\mu\text{m}$ 와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3에 n-buffer 확산 결과를 나타내었다.

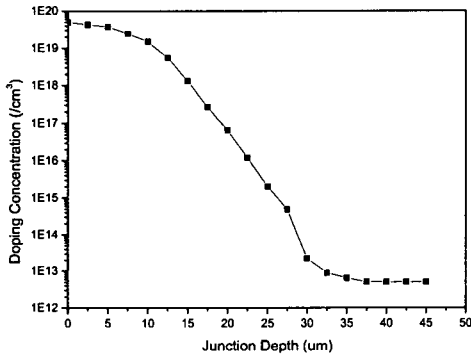


그림 3. n-buffer 확산 후 SRP 결과 (XjP = $37\mu\text{m}$).

캐소드전극을 얻기 위해서 $10\mu\text{m}$ 이상의 두꺼운 알루미늄을 증착한 후 식각공정을 수행하였다. 식각액의 온도를 바꾸어가며 실험한 결과 65°C 의 알루미늄 식각액 속에서 가장 좋은 식각 상태를 얻을 수 있었다. 높은 온도에서는 식각률이 너무 높아 정확한 시간 및 식각률 제어가 어려우며 낮은 온도에서는 식각시간이 길어져서 마스크물질의 상태 및 측면식각이 커지는 등의 문제가 발생한다. 따라서 정확한 온도제어 및 식각액의 조성비 제어가 좋은 식각상태를 얻는 방법이다. 아래의 그림 4에 a-step로 측정된 캐소드 finger 식각 단면을 나타내었다.

캐소드 및 게이트전극 공정 후 표면 보호를 위해 폴리이미드를 이용하여 노출된 표면을 보호하였다. 표면보호는 소자를 외부의 습기 및 오염물질로부터 보호하기 위한 것이다.

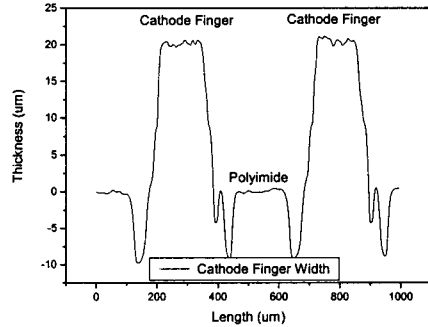


그림 4. 캐소드 패턴 식각 결과(a-step 측정).

고내압화를 위해서 2단 bevel 구조를 채용하였으며 bevel 구조는 주접합(내전압 혹은 정지전압을 결정하는 아래 부분의 두 접합) 단면이 측면으로 향하는 방향으로 노출되어 있으며, 칩(chip)의 가장 자리를 종방향으로 상면 혹은 상하 양면(triac에 유용)을 경사를 주어 깎아 내고(beveling) 유리를 구워 붙여 보호한 형태이다. 유리의 경우 물리·화학적으로 매우 안정한 물질이나 공정상 어려움이 있기 때문에 고분자 절연체로 보호하기도 한다.

2.2 제작된 소자의 전기적 특성

아래의 그림 5에 제작된 2.5kV 급 GCT 소자의 패키지 전의 외형을 나타내었다. 그림에서 GCT 소자는 소자가 턴-오프시 소자 보호를 위한 Free Wheeling Diode가 역병렬로 집적된 구조를 가지고 있다. 캐소드는 폭이 $200\mu\text{m}$, 길이가 $2600\mu\text{m}$ 인 finger 구조로 되어 있으며 4단으로 구성되어 있다. Finger의 개수는 총 430개로 각각의 finger에서 분담하는 전류는 1.2A 정도이다.

제작된 소자의 항복전압특성을 그림 6 및 7에 나타내었다. 측정된 소자의 캐소드-애노드접합 사이의 항복전압은 $2,715\text{V}$ 로 목표값인 2.5kV 를 상회하는 결과를 얻었다. 또한 2.5kV 급 시험소자의 게이트-캐소드 간의 전압을 측정하였다. 초기 공정에서는 9V 정도의 낮은 값을 얻었으나, 식각 공정의 정확도 및 횡방향으로의 식각률을 줄이면서 향상되어 목표 특성(20V)에 근접한 20.6V 의 특성을 얻을 수 있었다. 항복전압특성은 Tek371 curve tracer로 측정하였다

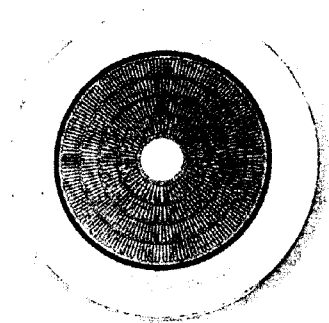


그림 5. 제작된 2.5kV급 GCT 소자.

길이가 2600 μm 인 finger 구조로 되어 있으며 4단으로 구성되어 있다. Finger의 개수는 총 430개로 각각의 finger에서 분담하는 전류는 1.2A 정도이다. 고내압화를 위한 깊은 확산은 알루미늄과 갈륨 및 보론을 불순물로 하였으며 소자의 스위칭 속도를 빠르게 하기 위해 투명 애노드구조를 채용하였다. 제작된 소자의 캐소드-애노드간의 항복전압은 2,715V이고 캐소드-게이트간의 항복전압은 20.6V이다.

감사의 글

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

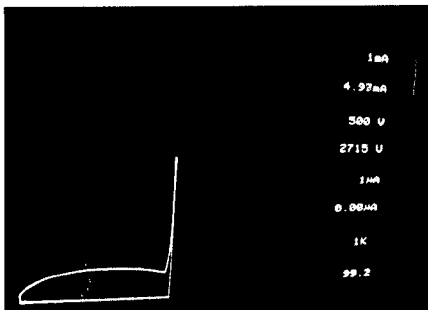


그림 6. 2.5kV급 공정소자의 애노드-캐소드간의 전압.

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

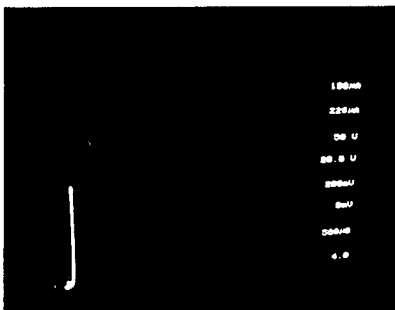


그림 7. 2.5kV급 공정소자의 게이트-캐소드간의 전압.

3. 결론

본 논문에서는 2.5kV급 GCT 소자의 제작 및 항복전압특성을 알아보았다. 소자제작을 위한 공정실험을 수행하였으며 각각의 공정 조건을 최적화하기 위한 실험을 수행하였다. 캐소드는 폭이 200 μm ,