

습식 산화를 이용한 원형 트렌치 게이트 IGBT에 관한 연구

An Analysis of IGBT(Insulator Gate Bipolar Transistor) Structure with an Additional Circular Trench Gate using Wet Oxidation

곽상현¹, 경신수¹, 성만영^{1,a}

(Sang-Hyeon Kwak¹, Sin Su Kyoung¹, and Man Young Sung^{1,a})

Abstract

The conventional IGBT has two problems to make the device taking high performance. The one is high on state voltage drop associated with JFET region, the other is low breakdown voltage associated with concentrating the electric field on the junction of between p base and n drift. This paper is about the structure to effectively improve both the lower on state voltage drop and the higher breakdown voltage than the conventional IGBT. For the fabrication of the circular trench IGBT with the circular trench layer, it is necessary to perform the only one wet oxidation step for the circular trench layer. Analysis on both the on state voltage drop and the breakdown voltage show the improved values compared to the conventional IGBT structure. Because the circular trench layer disperses electric field from the junction of between p base and n drift to circular trench, the breakdown voltage increase. The on state voltage drop decrease due to reduction of JFET region and direction changed of current path which pass through reversed layer channel. The electrical characteristics were studied by MEDICI simulation results.

Key Words : Circular trench, Wet oxidation, Breakdown voltage, On state voltage drop

1. 서론

절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT)는 현재 널리 적용되고 있는 고전압용 반도체 소자로 인버터, 고압 스위치, 모터구동 등과 같은 산업용에서 PDP, 전기밥솥 등과 같은 가정용 가전 등의 분야로 그 적용 영역이 확대되고 있다. 특히 초고압 시스템의 산업용으로 적용 시에는 항복전압에 대한 내성 및 낮은 온-상태 전압강하가 중요한 요구 조건이며 몇몇 연구그룹들이 높은 항복전압, 낮은 온-상태 전압강하와 빠른 스위칭 특성을 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있다[1].

일반적으로 IGBT는 DMOS 공정을 사용하여 제작하는데 이러한 소자는 기생 JFET 성분이 소자

의 전체 저항의 큰 부분을 차지하고 온-상태 전압강하를 크게 한다[2]. 원형 트렌치 IGBT(CIGBT)는 일반적인 IGBT보다 뛰어난 온-상태 전압강하 특성을 보이는데 그 이유는 구조상 기생 JFET 성분이 줄어들고 원형 트렌치 게이트를 따라 형성된 채널에 의해 전류의 흐름이 캐소드 쪽으로 기울기 때문이다. 낮은 온-상태 전압강하 특성을 확보하기 위해 그림 1(a)과 같이 CIGBT 구조가 제안되었다[3]. 이 구조는 JFET 영역을 줄여 온-상태 전압강하 특성을 개선시킬 뿐만 아니라 원형 트렌치 하단의 전계분산효과를 통해 항복전압을 높일 수 있다. 이에 소자 시뮬레이션 툴인 MEDICI를 이용하여 제안된 소자의 타당성을 검증하고자 하였다.

1. 고려대학교 전기공학과

(서울시 성북구 안암동 5가 1)

a. Corresponding Author : semicad@korea.ac.kr

접수일자 : 2008. 9. 5

1차 심사 : 2008. 10. 17

심사완료 : 2008. 10. 24

2. 제안 구조의 분석

2.1 제안 구조와 제조 공정

그림 1(b)는 본 논문에서 제안하는 원형 트렌치를 이용하는 CIGBT 구조이다. 제안한 구조의 공

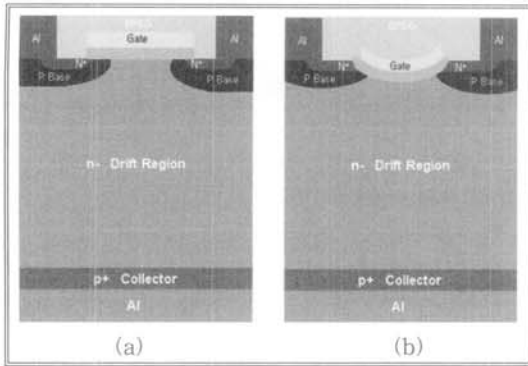


그림 1. 소자 구조 (a) 일반적인 IGBT, (b) CIGBT.
 Fig. 1. Device structure (a) Conventional IGBT, (b) CIGBT.

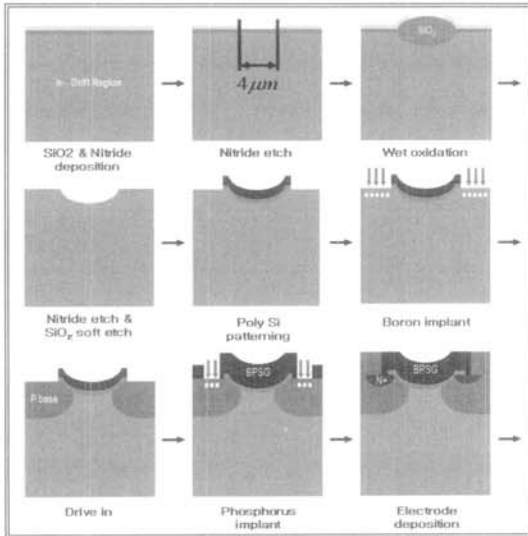


그림 2. 공정 순서.
 Fig. 2. Process sequence.

정순서는 그림 2에서 확인 할 수 있다[4]. 일반적인 IGBT 구조와 달리 CIGBT 구조는 원형 트랜치를 만들기 위한 추가적인 공정이 요구된다. 트랜치 영역을 만들 때 원형 트랜치의 너비와 P 베이스 사이의 거리가 짧을수록 축적층 영역 저항이 증가하기 때문에 P 베이스와 트랜치 영역간의 일정 간격을 유지하도록 주의해야 한다. 또한 원형 트랜치의 깊이가 P 베이스의 깊이보다 깊으면 원형 트랜치 하단에 전계가 집중하여 항복전압의 감소를 야기하므로 원형 트랜치의 깊이는 P 베이스의 깊이

와 같거나 작게 해야 한다. 원형 트랜치 형성 후 다음 공정은 일반 DMOS 공정과 같이 PR 패터닝을 하여 P 베이스 영역과 N 이미터 영역을 도핑 후 확산시켜 자기 정렬되게 만든다.

CIGBT 구조는 일반 DMOS 공정과 비교하여 원형 트랜치 공정을 위해 추가 마스크 한 장이 필요하며 비교적 긴 시간 동안의 습식 산화 공정이 필요하다. 트랜치 영역을 게이트로 사용하는 UMOS 공정과 비교하여 추가적인 습식 산화 공정이 요구되지만, 습식 산화를 통해 만들어진 산화막과 실리콘 사이 계면이 매우 매끄러워 폴리 게이트 평탄화 작업이 필요 없을 뿐 아니라 트랜치 공정 시 웨이퍼의 손상에 대한 우려가 없는 등 공정상 이점이 많다[5].

2.2 기존 IGBT 구조와 제안 구조의 비교 분석

일반적인 IGBT와 CIGBT의 전기적 특성을 살펴보기 위해 MEDICI와 TSUPREM4를 사용하여 시뮬레이션 하였다. N 이미터 두께를 0.5 μm , P 베이스 두께를 2.5 μm , N 드리프트 두께를 250 μm 으로 고정하였고 N 드리프트 영역의 농도는 $5.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 게이트 산화막의 두께를 5000 \AA 으로 하였다. 또한 두 구조 모두 단위 셀 크기를 14 μm 로 동일하게 형성하였다. 일반적인 구조와 CIGBT 구조의 차이를 시뮬레이션 결과를 통해 비교 분석하였다[5].

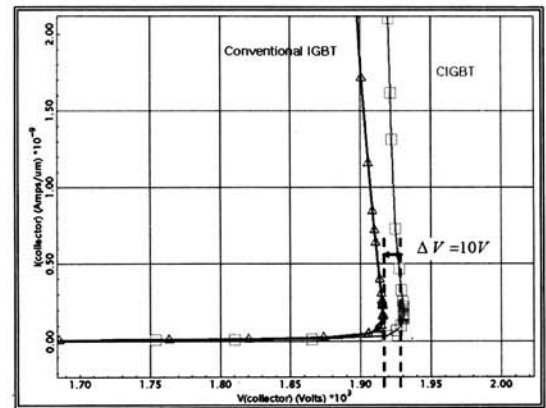


그림 3. 항복전압 특성의 비교.
 Fig. 3. Comparison of breakdown voltage.

시뮬레이션 결과 일반적인 IGBT에 비해서 제안한 구조의 소자가 항복전압의 향상과 온-상태 전압강하의 감소에서 우수한 특성을 보였다. 우선,

일반적인 IGBT와 CIGBT의 항복전압 특성을 알아보기 위해 게이트 바이어스를 0 V로 한 후 콜렉터 전압을 증가시켜 시뮬레이션 하였더니 항복전압이 일반적인 IGBT에 비해 10 V 향상하였다[6]. 그림 3에서 보는 바와 같이 일반적인 IGBT 구조의 항복전압은 1920 V이었으나 CIGBT 구조의 항복전압은 1930 V로 10 V 상승하였다.

이는 일반적인 IGBT에서 P 베이스 / N 드리프트 접합에 집중되었던 전계가 CIGBT의 원형 트렌치 하단으로 분산됨으로 더 높은 항복전압을 얻은 것이다. 전계가 분산된 정도를 살펴보기 위해 3차원 시뮬레이션 하였으며 그림 4에 나타내었다[7].

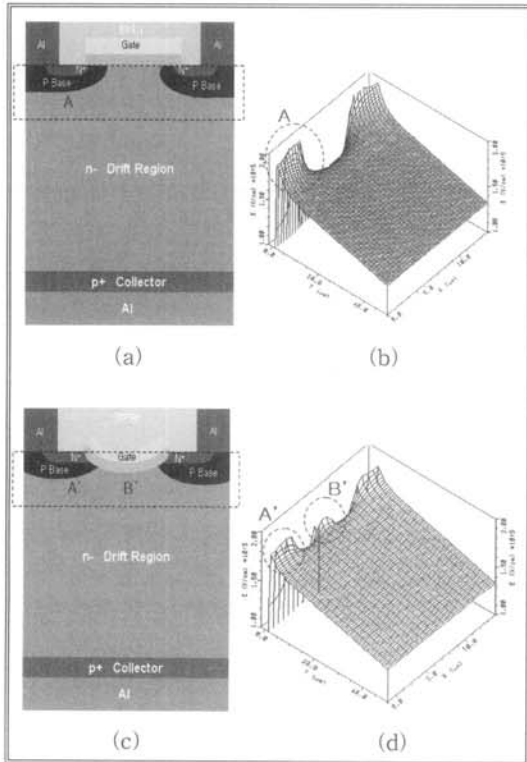


그림 4. 전계분산효과의 3차원 시뮬레이션 결과 (a) 일반적인 IGBT, (b) 일반적인 IGBT의 3차원 전계분포, (c) CIGBT, (d) CIGBT의 3차원 전계분포.

Fig. 4. 3-Dimensional simulation results of electric field distribution enhancement (a) Conventional IGBT, (b) 3-D distribution simulation, (c) CIGBT, (d) 3-D distribution simulation.

그림 4에서 보듯이 일반적인 IGBT의 경우 P 베이스 / N 드리프트 접합("A")의 코너에 전계가 집중되어 있음을 볼 수 있다. 반면에 CIGBT의 경우에는 일반적인 IGBT에서 "A"에 집중되었던 전계가 "B"로 분산되어 "A"의 최대 전계가 감소하였음을 볼 수 있다. "A"의 최대 전계는 1.85×10^5 V/cm이지만 "A"의 최대 전계는 1.7×10^5 V/cm로 CIGBT의 최대 전계가 0.15×10^5 V/cm 만큼 감소하였음을 알 수 있다.

다음으로 일반적인 IGBT와 CIGBT의 온-상태 전압강하를 비교하기 위해 게이트에 전압 15 V를 인가하여 턴 온 시킨 후 콜렉터에 전압을 서서히 증가시켜 시뮬레이션 하였다. 단위 셀 크기가 $14 \mu\text{m}$ 이므로 1400 A/cm^2 의 전류가 흐를 때 콜렉터 전압이 온-상태 전압강하이므로 그 때 인가된 전압을 비교하였다[6].

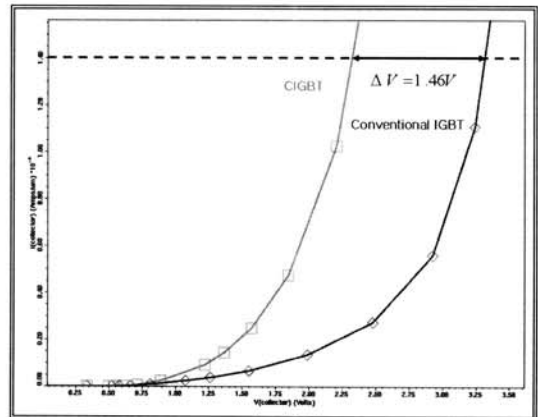


그림 5. 온-상태 전압강하 특성의 비교.
Fig. 5. Comparison of on state voltage drop.

시뮬레이션 결과 CIGBT는 일반적인 IGBT에 비해 온-상태 전압강하가 1.46 V 감소하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 일반적인 구조의 온-상태 전압강하는 3.79 V이며 원형 트렌치 구조의 온-상태 전압강하는 2.33 V로 원형 트렌치 구조가 일반적인 구조보다 1.46 V 작은 온-상태 전압강하특성을 보였다. 이는 그림 6에서 보듯이 CIGBT 구조의 소자가 원형 트렌치 영역에 의해 인접한 P 베이스 사이 JFET 영역("A")을 감소시켰기 때문이다. 또한 원형 트렌치의 측면에 형성된 채널을 따라 흘러나오는 전류의 방향이 그림 6(b)에서 보듯이 캐소드 쪽으로 기울어져 병목현상을 줄였기 때문이다[3].

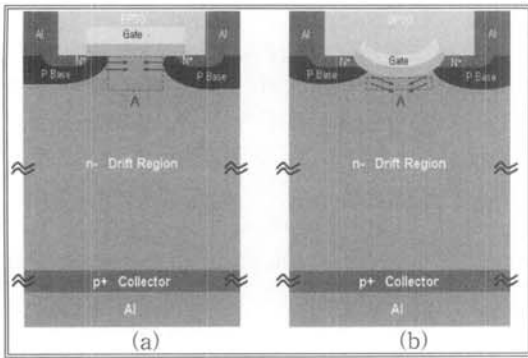


그림 6. JFET 영역의 분포 (a) 일반적인 IGBT, (b) CIGBT.

Fig. 6. CJFET region in device structure (a) Conventional IGBT, (b) CIGBT.

JFET 영역에서의 전류 흐름을 자세히 알아보기 위해 홀 전류 흐름을 시뮬레이션 하였다.

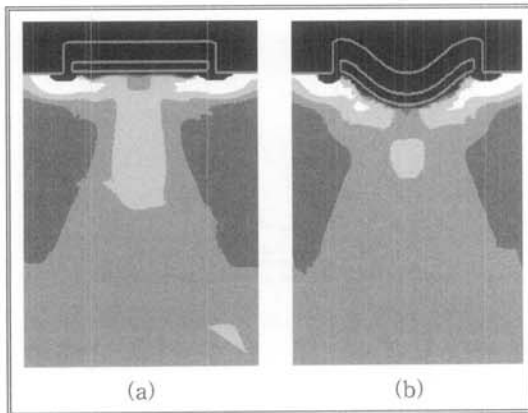


그림 7. 홀 전류 분포 (a) 일반적인 IGBT, (b) CIGBT.

Fig. 7. Hole current (a) Conventional IGBT, (b) CIGBT.

두 구조의 홀 전류 흐름은 위의 그림 7과 같다. CIGBT는 일반적인 IGBT와 비교하여 JFET 영역을 통해 흐르는 홀 전류가 크게 감소하였다. 또한 CIGBT의 홀 전류는 캐소드 쪽으로 넓게 퍼져 흐르나 일반적인 IGBT에서는 홀 전류가 게이트 하단에 집중됨을 알 수 있었다.

2.3 소자 특성 변화에 큰 영향을 미치는 디자인 파라미터의 효과 분석

CIGBT는 일반적인 IGBT에 비해서 항복전압 향상과 온-상태 전압강하의 감소에서 우수한 특성을 보였다. 항복전압 향상은 원형 트렌치 하단에 의한 전계분산과 관련되고 온-상태 전압강하의 감소는 원형 트렌치에 의한 JFET 영역의 감소, 병목 현상의 감소와 관련되기 때문에 원형 트렌치의 파라미터(트렌치 너비와 트렌치 깊이)가 변하면 두 특성의 값이 변화할 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 원형 트렌치의 파라미터 중 소자 특성에 가장 큰 영향을 미치는 트렌치 깊이를 변화시키고 그에 따른 항복전압과 온-상태 전압강하의 변화를 알아보았다.

원형 트렌치의 깊이 변화를 알아보기 위해 트렌치 너비를 결정하는 질화막의 식각 너비를 4 μm로 고정된 후, 확산 온도와 확산 시간 변화에 따라 시뮬레이션 하였다.

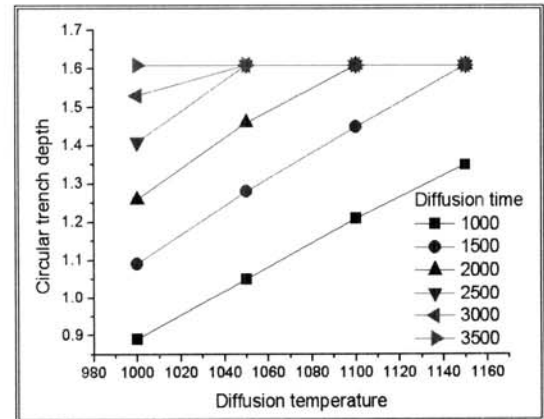


그림 8. 확산 파라미터에 따른 CIGBT의 원형 트렌치 깊이 변화.

Fig. 8. Change of the circular trench depth depending on the diffusion temperature and the diffusion time.

그림 8에서 볼 수 있듯이 비교적 짧은 확산 시간일 때(1000분과 1500분)는 확산 시간의 증가에 따라 원형 트렌치 깊이가 선형적으로 증가하였다. 또한 2000분 이상의 긴 확산 시간에서도 확산 온도의 증가에 따라 원형 트렌치 깊이가 선형적으로 증가하였다. 하지만 확산 시간과 온도를 계속 증가시켜도 습식 산화를 통해 얻을 수 있는 원형 트렌

치 깊이의 최대 깊이는 1.61 μm 이었다. 이는 비교적 낮은 확산 온도와 짧은 확산 시간동안 생성된 얇은 산화막을 산소가 쉽게 투과하여 트렌치 깊이가 선형적으로 증가하였으나 확산 온도가 높을수록, 확산 시간이 증가할수록 두꺼워진 산화막을 산소가 확산을 통해 이동함으로써 산화막 성장률이 급격히 감소하여 트렌치 깊이가 포화된 것이다.

이것으로 질화막의 식각 너비가 4 μm 로 고정된 실리콘에서 습식 산화를 통해 얻을 수 있는 원형 트렌치 영역의 최대 깊이는 1.61 μm 임을 알 수 있었다.

확산 온도와 시간에 따른 항복전압과 온-상태 전압강하의 변화를 알아보기 위해 원형 트렌치 깊이 변화 시뮬레이션과 동일한 조건으로 시뮬레이션 하였다. 그림 9는 확산 온도와 시간의 변화에 따른 항복전압이고 그림 10은 동일한 조건에서 온-상태 전압강하이다.

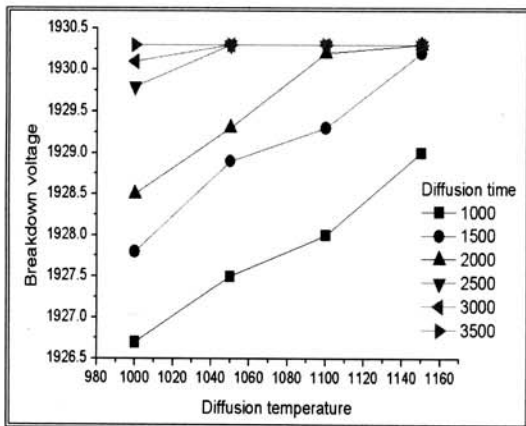


그림 9. 확산 파라미터에 따른 CIGBT의 항복전압 특성 변화.

Fig. 9. The breakdown voltage depending on diffusion parameter in the circular trench depth structure.

그림 10은 항복전압 시뮬레이션과 동일한 확산 온도와 시간 조건에 따른 온-상태 전압강하의 변화이다. 원형 트렌치 깊이가 깊어질수록 온-상태 전압강하가 최대 2.33 V 까지 감소하였다. 일반적인 IGBT의 온-상태 전압강하가 3.79 V 임을 고려했을 때 원형 트렌치를 함으로써 온-상태 전압강하가 1.46 V 만큼 크게 감소하였다. 이것은 원형 트렌치에 의해 P 베이스 간에 JFET 영역이 감소

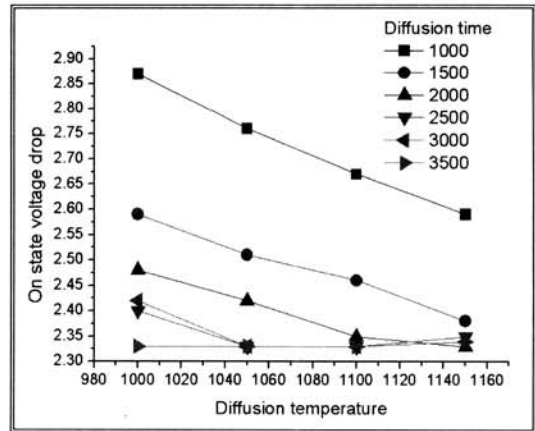


그림 10. 확산 파라미터에 따른 CIGBT의 온-상태 전압강하 특성 변화.

Fig. 10. The on state voltage drop depending on diffusion parameter in the circular trench depth structure.

하였고 원형 트렌치 게이트를 통해 흐르는 전류 흐름의 방향이 캐소드 쪽으로 기울어져 병목현상을 줄였기 때문이다. 또한 그림 9에 나타난 항복전압의 경향과 비슷하게 원형 트렌치 깊이가 최대값으로 일정해지면 더 이상 온-상태 전압강하가 감소하지 않고 일정해지는 것을 확인할 수 있었다.

이로서 항복전압과 온-상태 전압강하 특성은 원형 트렌치 깊이가 증가함에 따라 향상됨을 볼 수 있었고 원형 트렌치 깊이에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 CIGBT 소자 제작 시 원형 트렌치 깊이의 최적화가 최우선으로 이루어져야 할 것이다.

3. 결론

원형 트렌치를 이용하는 CIGBT 구조는 기생 JFET 성분을 제거하여 온-상태 전압강하를 줄이기 위해 제안되었다. 하지만 CIGBT에서 원형 트렌치 영역은 온-상태 전압강하를 감소시키는 효과뿐만 아니라 항복전압을 높이는 특징을 가지고 있으며 추가적인 습식 산화 공정만으로 쉽게 형성할 수 있어 일반적인 IGBT에 비해 전기적 특성 및 공정상 이점이 많은 구조이다.

본 논문에서 제안하는 원형 트렌치를 이용하는 원형 트렌치 IGBT 구조는 전력용 반도체에 있어서는 아주 효과적인 구조이며, 향후 원형 트렌치

깊이와 너비에 대해 심층적인 연구를 통하여 최적화된 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 전력IT 사업 중 “분산발전 및 산업용 인버터 응용을 위한 전력반도체 기술개발”에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. Jayant Baliga, “Power Semiconductor Devices”, PWS, p. 426, 1996.
- [2] M. Nemoto and B. Jayant Baliga, “The Recessed-gate IGBT Structure”, ISPSD, p. 149, 1999.
- [3] V. Tsukanov and N. Zommer, “Shallow Trench Power MOSFET and IGBT”, U.S. Patent No. 7.063.975 B2, Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [4] J.-S. Lee, H.-H. Shin, and M. Y. Sung, “The Effect of a Shielding Layer on Breakdown Voltage in Trench gate IGBT”, ICPE07, p. 62, 2007.
- [5] S. W. Yu, H. S. Lee, and M. Y. Sung, “An analysis of new IGBT(insulator gate) structure having a additional recessed with E-field shielding layer”, Journal of IKEEE, Vol. 11, p. 247, 2007.
- [6] E. G. Kang and M. Y. Sung, “A small sized lateral trench electrode IGBT for improving latch-up and breakdown characteristics”, Solid State Electronics, Vol. 46, p. 295, 2002.
- [7] S. S. Kyoung, J. S. Lee, E. G. Kang, and M. Y. Sung, “A Study on 1700 V Trench Insulated Gate Bipolar Transistor(TIGBT)’s Electrical Characteristics using Trench Ion Implantation”, ITC-TSCC2008, p. 1665, 2008.