

인텔리전트 파워 IC의 구현을 위한 횡형 트렌치 전극형 IGBT의 제작 및 그 전기적 특성에 관한 연구

A Novel Lateral Trench Electrode IGBT for Superior Electrical Characteristics

강이구, 오대석, 김대원, 김대중, 성만영*

(Ey Goo Kang, Dae Suk Oh, Dae Won Kim, Dae Jong Kim, and Man Young Sung)

Abstract

A new small size Lateral Trench Electrode Insulated Gate Bipolar Transistor (LTEIGBT) is proposed and fabricated to improve the characteristics of device. The entire electrode of LTEIGBT is placed to trench type electrode. The LTEIGBT is designed so that the width of device is $19\mu\text{m}$. The latch-up current density of the proposed LTEIGBT is improved by 10 and 2 times with those of the conventional LIGBT and LTIGBT. The forward blocking voltage of the LTEIGBT is 130V. At the same size, those of conventional LIGBT and TIGBT are 60V and 100V, respectively. Because the electrodes of the proposed device is formed of trench type, the electric field in the device are crowded to trench oxide. When the gate voltage is applied 12V, the forward conduction currents of the proposed LTEIGBT and the conventional LIGBT are 80mA and 70mA, respectively, at the same breakdown voltage of 150V.

Key Words : Trench Electrode, Latch-up, Forward blocking voltage, High speed

1. 서론

21세기는 IT(Information Technology)와 환경의 시대로 막을 올렸다. 물론 이들의 기술을 지탱하는 것이 Si를 중심으로 한 반도체 기술임은 두말할 필요도 없으나, IGBT를 포함한 파워 반도체 소자도 이들 산업의 견인차로서 큰 몫을 차지하고 있다.[1-4] MOS로 구동하는 대표적인 파워 소자인 IGBT는 오프상태에서 높은 전압 저지 능력, 온 상태에서의 높은 전류밀도와 낮은 전압 강하, 파워 BJT에 비해 빠른 스위칭 그리고 게이트 구동전력도 작은 우수한 전기적 특성을 가지고 있다. 개별 소자

로 많이 사용되는 수직형 IGBT는 그동안 많은 발전을 이루어 최근에는 2000V, 10A이상의 높은 전압-전류 정격을 갖는 소자도 보고되고 있다[5]. 반면에 인텔리전트 파워 IC에 사용되는 수평형 IGBT의 경우, 전류밀도에 있어서는 단락된 애노드 LIGBT, 이중 게이트 LIGBT 그리고 트렌치 게이트형 LIGBT 등 그 구조적인 개선으로 말미암아 래치 업이 일어나지 않은 상태에서 높은 전류밀도를 갖는 소자를 개발하여 왔으나 정격전압을 유지하기 위해서 소형화 그리고 경량화를 이루지 못하고 있는 상황이다 [6,7].

따라서 본 논문에서는 위와 같은 단점을 보완하기 위해서 모든 전극을 트렌치 형으로 대체함과 동시에 소자의 정격전압에 결정적인 영향을 주는 드리프트층의 길이를 $19\mu\text{m}$ 으로 설계한 수평형 트렌치 전극형 IGBT(Lateral Trench Electrode IGBT : LTEIGBT)

* : 고려대학교 전기공학과

(Fax : 02-921-1325)

E-mail : semicad@mail.korea.ac.kr

2002년 4월 29일 접수, 2002년 5월 20일 1차 심사완료,

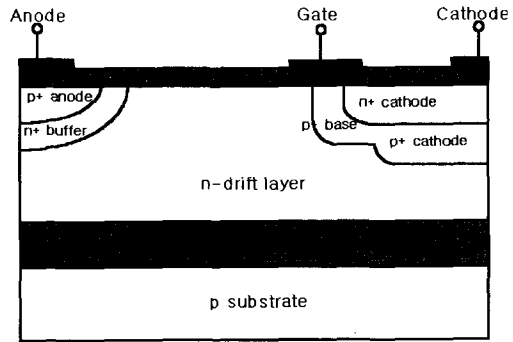
2002년 6월 4일 최종 심사완료

를 제안하였다. 일반적으로 LIGBT 소자의 드리프트층의 길이는 $80\mu\text{m}$ 이상으로 설계하여 200-300V의 전압을 유지하고 있다[8-12]. 그리고 제안된 LTEIGBT의 검증에 위해서 2-D 소자 시뮬레이터인 MEDICI를 이용하여 순방향 전도 특성, 순방향 저지 특성 그리고 턴 오프 특성등의 전기적인 특성을 분석하였다. 또한 제안된 소자의 제작을 위해서 2-D 공정 시뮬레이터인 TSUPREM4를 이용해서 제작공정에 관하여 고찰한 후, CMOS 공정을 이용하여 제안된 LTEIGBT를 제작하였다.

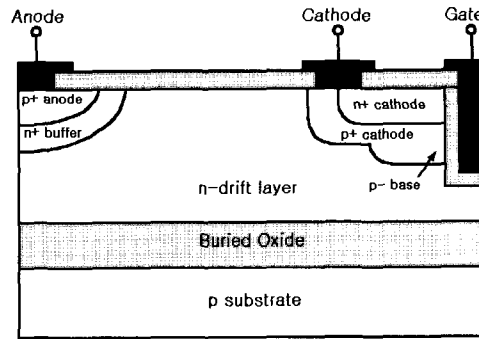
2. 소자의 구조 및 동작

그림 1은 기존의 LIGBT, LTIGBT 그리고 제안된 LTEIGBT의 구조를 보여주고 있다. LIGBT와 LTIGBT와의 주요 차이는 그림 1에 나타낸 바와 같이 게이트 전극 구조이다. 기존의 LIGBT는 애노드 전극과 캐소드 전극 사이에 게이트 전극을 설치하여 전자전류를 제어하고 있으며, 기존의 LTIGBT는 게이트 전극 구조가 트렌치 타입으로 형성되어, 애노드와 게이트 전극 사이에 캐소드 전극을 형성한 구조이다. 기존의 LIGBT의 경우, 소자가 온 상태에 있게 되면 애노드에서 주입된 홀들이 캐소드 전극 밑에 놓여 있는 p 베이스 층과 p+ 캐소드 층을 지나서 흐르게 된다. 그런데 주입된 대부분의 홀들이 래치 업의 주 원인이 되는 p 베이스 층을 지나가기 때문에 낮은 전류에서 래치 업이 발생하게 되어 소자의 동작 안전 영역이 크게 줄어들게 된다. 그러나 기존의 LTIGBT에서는 게이트 전극을 트렌치 구조이기 때문에 채널이 수평으로 형성되지 않고 수직으로 형성하게 되며, 캐소드 전극과 게이트 전극의 순서를 바꾸었기 때문에, 애노드에서 주입된 홀들이 p 베이스층을 지나지 않고 캐소드 전극으로 흐른다. 따라서 기존의 LIGBT보다는 래치 업이 늦게 발생하게 되며 최대 전류밀도도 상당히 높아지게 된다. 그러나 순방향 저지 특성은 크게 개선을 시키지 못하였다.

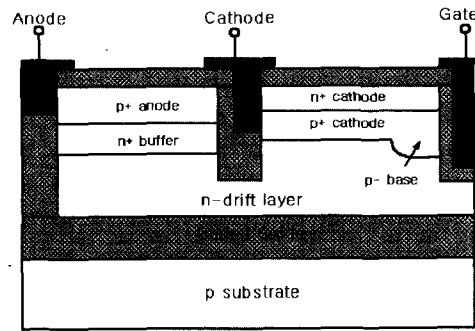
기존의 LTIGBT 소자와 제안한 LTEIGBT 소자의 주요 차이점은 애노드와 캐소드 전극의 모양이다. 제안한 LTEIGBT는 온 상태에서 흐르는 홀 전류가 p 베이스 층을 지나지 않고 바로 캐소드 전극으로 흐른다는 LTIGBT의 장점을 포함하면서, 애노드와 캐소드 전극을 모두 트렌치 형의 구조로 설계하여 순방향 저지 능력을 극대화한 구조이다. 일반적으로 소자의 정격을 규정짓는 대표적인 전기적인 특성으



(a)



(b)



(c)

그림 1. 기존의 LIGBT, LTIGBT 그리고 제안된 LTEIGBT 소자들의 단면도 (a) 기존의 LIGBT (b) 기존의 LTIGBT (c) 제안된 LTEIGBT.

Fig. 1. The cross sectional diagrams of the conventional LIGBT, conventional LTIGBT and proposed LTEIGBT (a) The conventional LIGBT (b) The conventional LTIGBT (c) The proposed LTEIGBT.

로는 순방향 전류와 순방향 항복 전압이다. 그런데 소자를 작게 만들기 위해서는 n 드리프트 층의 너비를 줄이는 것이 불가피한데, n 드리프트 층의 길이를 작게 만들면 소자의 항복전압이 급격히 줄어들게 된다. 이것이 수평형 파워 소자에서 소자를 작게 만들지 못하는 가장 큰 이유다. 그러나 제안한 구조에서는 모든 전극을 트렌치 산화막을 형성하여 만들었기 때문에 소자 내부에 걸리는 전계가 저항이 큰 산화막에 집중하게 되어 소자를 작게 만들더라도 항복 전압은 그대로 유지할 수 있는 효율적인 구조이다.

3. 소자 및 공정 시뮬레이션

소자를 제작하기에 앞서 제안된 소자의 타당성을 검증하기 위해 2-D 소자 및 공정 시뮬레이터인 MEDICI와 TSUPREM4를 이용하여 소자 및 공정 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2는 제안된 LTEIGBT와 기존의 LIGBT 그리고 LTIGBT의 순방향 전도 특성을 나타내고 있다. 순방향 전도 특성은 게이트에 20V의 입력전압을 인가하여 채널을 형성한 다음, 애노드 전극에 전압을 점진적으로 증가시켜 측정된 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존의 LIGBT의 경우 애노드 전압 0.7V, 전류밀도 $120 A/cm^2$ 에서 래치 업이 발생하고 있으며, LTIGBT의 경우 애노드 전압 2.0V, 전류밀도 $540 A/cm^2$ 에서 래치 업이 발생하고 있다. 기존의 LIGBT의 경우 그 구조상 애노드에서 주입된 정공들이 래치 업을 발생시키는 p 베이스 영역을 통과하게 되어 있어, 작은 애노드 전압 그리고 작은 래칭 전류밀도에서 래치 업이 발생하게 되며, LTIGBT의 경우 게이트가 트렌치 산화막으로 형성되었기 때문에 전자전류를 흐르게 하는 채널은 수직으로 형성이 된다. 채널이 수직으로 형성되었기 때문에 우선 p 베이스 영역과 p+ 캐소드 영역이 서로 바뀌게 되어 애노드-게이트-캐소드 전극의 순서가 애노드-캐소드-게이트의 역 채널 구조가 된다. 따라서 애노드와 캐소드간의 거리가 줄어들게 되며, 애노드에서 주입된 정공은 p 베이스 영역을 거치지 않고 p+ 캐소드 영역을 거쳐 n+ 캐소드 영역으로 직접 들어가게 된다. 애노드에서의 전압이 점진적으로 증가하여 애노드 영역에서 주입되는 정공이 점점 많아지게 되면, p 베이스 영역을 거치는 정공은 많아지고 결국에는 래치 업이 발생하게 되지만, 더 큰 애노드 전압과 전류밀도에서 래치 업이 발생하게 된다. 제안된 LTEIGBT의 경우 그림에서 나타난 것처럼 애노드

전압 8V, 래칭 전류밀도 $1230 A/cm^2$ 에서 래치 업이 발생하고 있다. 이는 기존의 소자들에 비해 각각 10배 그리고 2배 정도의 높은 전류밀도를 나타내고 있다. 설계 시점에서는 항복내압에 초점을 맞추어 설계를 하였지만, 래칭 전류 특성에도 제안한 LTEIGBT 소자가 상당히 우수한 특성을 보이고 있는 바, 기존의 소자들을 충분히 대체 할 수 있는 소자라 사료된다. 애노드에서 캐소드 사이의 거리는 LTIGBT의 경우에는 $12\mu m$, 제안된 LTEIGBT의 경우에는 $5\mu m$ 에 불과하다. 그리고 기존의 LIGBT는 $17\mu m$ 으로 정공의 흐름에 대한 길이는 거의 에피층의 길이를 다 차지하고 있다. 따라서 제안된 LTEIGBT는 애노드와 캐소드 간의 거리가 기존의 소자들에 비해 짧기 때문에 래치 업이 가장 높은 전류밀도에서 발생하고 있으며, 래칭 시 일어나는 애노드 전압 또한 8V로서 가장 높다.

그림 3은 소자들의 중요한 특성 중 하나인 순방향 항복특성을 나타내고 있다. 본 논문에서 제안한 LTEIGBT의 경우 드리프트 층의 길이는 파워 소자에서는 있을 수 없는 $17\mu m$ 으로 설계하였으며, 기존의 소자와는 달리 모든 전극을 트렌치 구조로 설계하여, 같은 길이로 설계한 기존의 LIGBT의 내압보다 큰 전압을 얻을 수가 있었다. 기존의 LIGBT와 LTIGBT의 경우에는 애노드 전극과 캐소드 전극에 인가되는 전압에 의해 발생하는 전계가 각각의 접합과 매몰산화막에 집중되어서 공핍층이 옆으로 확장하기 보다는 매몰 산화막 바로 위 부근에서 공핍층이 확장되어 애노드 영역의 공핍층과 캐소드 영역의 공핍층이 만나 펀치스루 항복이 발생하였다. 항복전압은 각각 60V와 100V가 계산되었으며, LTIGBT가 LIGBT보다 높게 나온 것은 게이트 영역을 트렌치 구조로 설정하여 내부에 걸리는 전계가 게이트 영역의 산화막쪽으로도 나누어지기 때문에 펀치스루 항복이 늦게 발생되기 때문이다. 반면에 제안된 LTEIGBT의 경우 이전의 소자와는 달리 모든 전극을 트렌치 게이트와 마찬가지로 트렌치 형태로 설정되었기 때문에 소자에 걸리는 전계가 모두 3개의 트렌치 산화막과 매몰 산화막에 집중하여 소자의 내부에 있는 접합에는 작은 전계가 인가되게 된다. 따라서 공핍층의 확장은 늦어지게 되며, 펀치 스루 항복 보다는 보다 높은 전압에서 이루어지는 충돌 이온화에 의한 눈사태 항복이 일어나는 것으로 밝혀졌다. 따라서 항복전압은 기존의 소자보다 각각 2.3배, 1.4배정도 증가한 140V로 측정되었다. 이 전압은 기존 소자의 에피층의 길이가 $80\mu m$ 이상에서 측정되는 전압이며, 제안된 소자의 에피층의 길이는 $17\mu m$ 에 불

과하다. 이와같이 소자의 전극을 트렌치 형태로 만들게 되면, 소자의 크기를 대폭 줄일 수 있다는 것으로 판단된다. 또한 이러한 구조의 응용은 LIGBT 뿐만 아니라 다른 파워 소자에도 응용하여 항복전압을 높일 수 있는 아주 유용한 구조라고 판단된다.

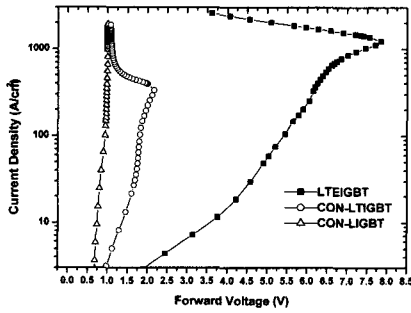


그림 2. 기존의 LIGBT, LTIGBT 그리고 제안된 LTEIGBT의 순방향 전도 특성.

Fig. 2. The forward conduction characteristics of the conventional LIGBT, LTIGBT and the proposed LTEIGBT.

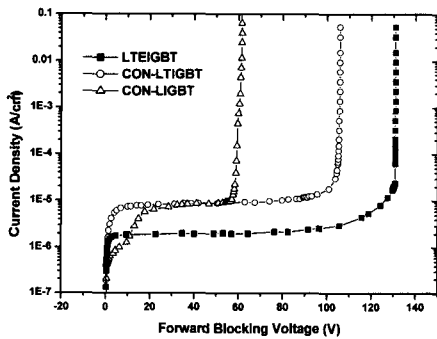


그림 3. 기존의 LIGBT, LTIGBT 그리고 제안된 LTEIGBT의 순방향 항복 특성.

Fig. 3. The forward blocking characteristics of the conventional LIGBT, LTIGBT and the proposed LTEIGBT.

그림 4는 기존의 소자들과 제안된 LTEIGBT 소자의 턴 오프 특성을 나타내고 있다. 기존의 소자인 LIGBT 또는 LTIGBT의 턴 오프 시간은 모두 1 μ s이며, 제안된 LTEIGBT의 경우에는 0.3 μ s를 나타내고 있다. 래칭 전류밀도 그리고 항복특성이 좋은 제안

된 LTEIGBT소자는 스위칭 특성의 면에서도 기존의 소자보다 약 4배정도 빠른 스위칭 특성을 보여주고 있다. 기존의 LIGBT와 LTIGBT와 차이점이 보이지 않는 것은 게이트 영역을 트렌치 구조로 설정하였다 하더라도 드리프트 층의 영역은 큰 차이를 보이지 않았고, 남아있는 소수캐리어의 양도 변화가 없었기 때문이라고 판단된다. 그러나 제안된 LTEIGBT의 경우는 애노드 전극과 캐소드 전극사이가 드리프트 영역으로 채워져 있는 반면에 애노드 전극과 캐소드 전극사이에는 드리프트 영역 대신에 트렌치 산화막이

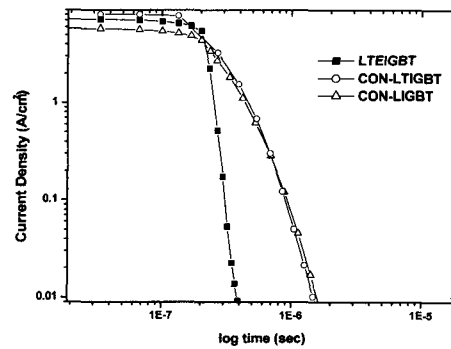


그림 4. 기존의 LIGBT, LTIGBT 그리고 제안된 LTEIGBT의 턴 오프 특성.

Fig. 4. The turn-off characteristics of the conventional LIGBT, LTIGBT and the proposed LTEIGBT.

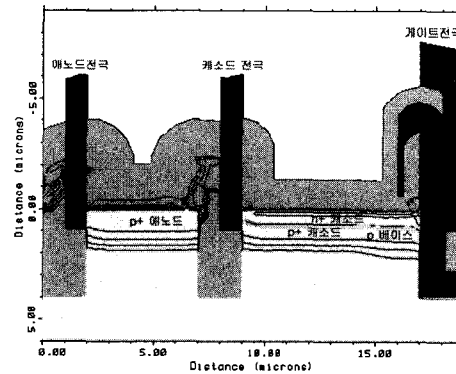


그림 5. 공정시뮬레이션을 통해 얻어진 제안된 LTEIGBT 소자.

Fig. 5. Cross-sectional diagram of the proposed LTEIGBT device obtained by process simulation.

존재한다. 따라서 기존의 소자들보다 드리프트 영역이 작기 때문에 남아있는 소수캐리어의 양도 그만큼 줄어들고 따라서 재결합시간도 짧아지는 것으로 판단된다. 결국, 제안된 LTEIGBT는 파워소자의 가장 중요한 특성중에 하나인 스위칭 특성도 상당히 우수하게 관측되고 있어, 향후 파워 시장에 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다. 그림 5는 제작 공정에 관한 고찰하기 위해 수행된 공정 시뮬레이션을 통해 얻어진 소자의 최종 구조도이다.

4. 소자의 제작 및 전기적 특성 분석

소형 LTEIGBT 소자를 제작하기 위해서 N형, (1,0,0) 방향을 가지며, 비저항 1-10 Ω-cm를 갖는 웨이퍼를 선택하였다. 제작 공정을 수행한 결과,

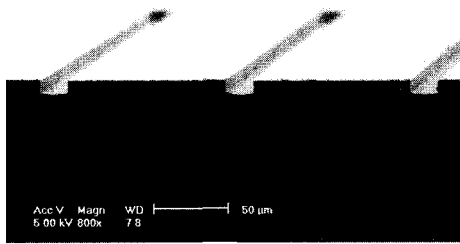


그림 6. 트렌치 공정후의 Si 웨이퍼의 단면도(FE-SEM).
Fig. 6. The cross section after trench process (FE-SEM).

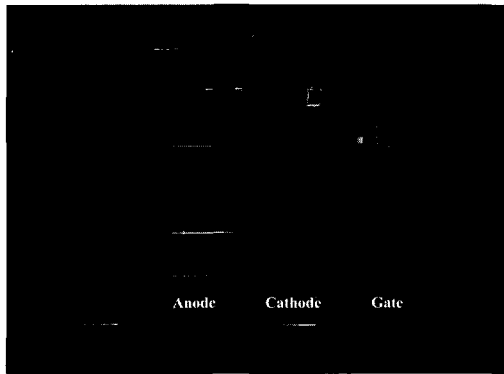


그림 7. 제작된 LTEIGBT 소자(FE-SEM).
Fig. 7. The fabricated LTEIGBT (FE-SEM).

게이트 산화막의 두께는 1000 Å이며, 드리프트 층의 길이는 17 μm이다. 그리고 n+ 캐소드 영역의 농도는 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 이고, p+ 애노드 영역의 농도는 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 이다. 또한 채널 형성을 위한 p 베이스 영역의 농도는 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이다.

제안된 소자들의 제작을 위해 본 연구에서는 총 7장의 마스크를 설계하여 제작하였으며, 4인치 웨이퍼 공정을 수행하기 위해 5인치 크롬 마스크를 제작하였으며, 4×4 어레이(Array) 구성을 통해 총 16개

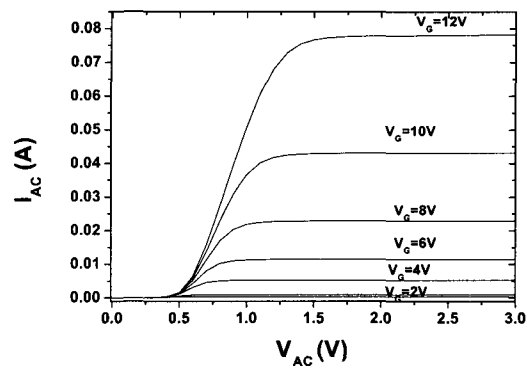


그림 8. 제작된 LTEIGBT 소자의 I-V 특성.
Fig. 8. The I-V characteristics of the fabricated LTEIGBT.

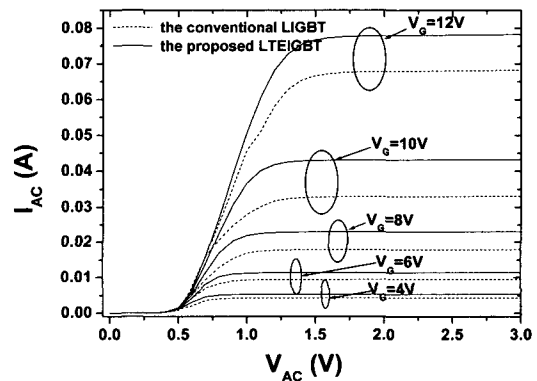


그림 9. 제작된 LTEIGBT소자와 기존의 LIGBT 소자의 I-V 특성 비교.
Fig. 9. The comparison of I-V characteristics of the fabricated LTEIGBT and conventional LIGBT (BV=150V).

의 단위 셀이 4인치 웨이퍼에 제작되도록 하였다. 그리고 제작된 소자의 활성영역의 면적은 $60 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 이다.

그림 6에서는 트렌치 전극 형성을 위해 트렌치 공정을 수행한 후 FE-SEM에 의한 소자의 수직 단면도를 보여주고 있다. 소자의 트렌치 깊이는 $4 \mu\text{m}$ 이며, 트렌치 공정이 잘 수행된 것을 알 수 있다. 그림 7은 제작된 LTEIGBT의 최종 평면도를 보여주고 있다. 그림 8은 제작된 LTEIGBT의 I-V 특성곡선을 보여주고 있으며, 게이트 전압 12V일 때 최대전류값은 80mA로 상당히 높은 전류밀도를 나타내고 있다는 것을 알 수 있으며, 또한 온 전압도 1V이하로서 우수한 온 상태 특성을 보여주고 있다. 그림 9는 제안된 LTEIGBT와 기존의 LIGBT의 I-V 특성을 비교하고 있는 것으로서 두 소자 모두 150V의 항복내압을 갖는 소자이다. 이러한 조건하에서 제안된 소자가 최대전류에서 약 10mA 정도가 더 높게 나타났으며, 동시에 항복내압은 같지만 소자의 크기는 앞에서 서술한 바와 같이 제안된 소자가 기존의 소자에 비해 1/5에 불과하다는 것을 감안한다면 같은 크기에서는 더 높은 전류가 나올 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 논문에서는 파워 소자의 소형화, 경량화 및 고성능화를 추구하기 위해 소형 LTEIGBT 소자를 제안하고, 시뮬레이션과 제작을 통한 전기적인 분석을 통해 소자의 타당성을 검증하였다. 두 분석을 통해 래칭 전류밀도의 경우 제안된 소자가 기존의 소자에 비해 우수한 특성을 갖는 것으로 판명됨과 동시에 항복내압에 있어서도 소자의 크기가 작음에도 불구하고 큰 내압을 가질 수가 있었다. 이와 같은 결과로 미루어 보아 본 논문에서 제안된 소자는 인텔리전트 파워 IC 시스템의 소형화 및 고성능화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부(2000-J-EH-01-B02)와 과학재단의 특정기초과제연구(1999-2-302-017-5)의 지원에 의해 수행된 일부임.

참고 문헌

[1] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Devices",

PWS, p. 452, 1996.

[2] B. H. Lee, C. M. Yun, D. S. Byeon, M. K. Han, and Y. I. Choi, "A trench-gate silicon-on-insulator lateral insulated gate bipolar transistor with the p+ cathode well", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 3, p. 854, 1994.

[3] T. P. Chow, "A reverse-channel, high voltage lateral IGBT", *Proc. ISPSD*, p. 57, 1994.

[4] N. Thapar and B. J. Baliga, "An experimental evaluation of the on-state performance of trench IGBT designs", *SSE*, Vol. 42, No. 5, p. 771, 1998.

[5] 강이구, 성만영, "인텔리전트 파워 IC의 기술동향", *전기전자재료학회지*, 15권, 3호, p. 10, 2002.

[6] Jun Cai, K. O. Sin Johnny, and K. T. Mok Philip, "A new lateral trench-gate conductivity modulated power transistor", *IEEE Trans. Elec. Dev.*, Vol. 46, No. 8, p. 1778, 1999.

[7] I. Y. Park and Y. I. Choi, "Trench cathode TIGBT with improved latch-up characteristics", *Phys. Scrip.*, Vol. T79, p. 337, 1999.

[8] T. Trajkovic, F. Udrea, G. A. J. Amaratunga, W. I. Milne, S. S. M. Chan, P. R. Waind, J. Thomson, and D. E. Crees, "Silicon MOS controlled bipolar power switching devices using trench technology", *Int. J. Elect.*, Vol. 86, No. 10, p. 1153, 1999.

[9] F. Udrea and G. Amaratunga, "The trench insulated gate bipolar transistor a high power switching device", *Proc. 20th Int. Conf. Micro.*, p. 369, 1995.

[10] E. G. Kang, S. H. Moon, and M. Y. Sung, "Simulation of a novel lateral trench electrode IGBT with improved latch-up and forward blocking characteristics", *Trans. on EEM*, Vol. 2, No. 1, p. 32, 2001.

[11] 강이구, 성만영, "래치 업 특성의 개선과 고속 스위칭 특성을 위한 다중 게이트 구조의 새로운 LIGBT", *전기전자재료학회논문지*, 13권, 5호, p. 371, 2000.

[12] E. G. Kang and M. Y. Sung, "A novel EST with trench electrode to immunize snab-back effect and to obtain high blocking voltage", *Trans. on EEM*, Vol. 2, No. 3, p. 33, 2001.