

트렌치 산화막을 갖는 정전유도트랜지스터의 전기적 특성에 관한 연구

A Study on the Electrical Characteristics in the Static Induction Transistor with Trench Oxide

강이구¹, 김제윤², 홍승우², 성만영^{2,a}

(Ey Goo Kang¹, Je-Yoon Kim², Seung Woo Hong², and ManYoung Sung^{2,a})

Abstract

In this paper, two types of vertical SIT(Static Induction Transistor) structures are proposed to improve their electrical characteristics including the blocking voltage. Besides, the two dimensional numerical simulations were carried out using ISE-TCAD to verify the validity of the device and examine the electrical characteristics. First, a trench gate region oxide power SIT device is proposed to improve forward blocking characteristics. Second, a trench gate-source region power SIT device is proposed to obtain more higher forward blocking voltage and forward blocking characteristics at the same size. The two proposed devices have superior electrical characteristics when compared to conventional device. In the proposed trench gate oxide power SIT, the forward blocking voltage is considerably improved by using the vertical trench oxide and the forward blocking voltage is 1.5 times better than that of the conventional vertical power SIT. In the proposed trench gate-source oxide power SIT, it has considerable improvement in forward blocking characteristics which shows 1500V forward blocking voltage at -10V of the gate voltage. Consequently, the proposed trench oxide power SIT has the superior stability and electrical characteristics than the conventional power SIT.

Key Words : Power semiconductor, SIT, Forward blocking characteristic, Trench oxide, JFET

1. 서론

전력용 반도체 소자들은 전기 전자 산업의 비약적인 발전과 더불어 산업 설비, 가전기기, 수송, 정보, 통신용 시스템 등의 광범위한 분야에서 전원장치, 전력 변환 및 제어 장치 등의 핵심 부품으로 꾸준한 발전을 계속하고 있으며 최근 전기 에너지

에 대한 의존도가 높아지면서 고도 정보화 사회와 결합하여 전력 반도체 소자들의 응용 범위가 더욱 넓어지고 있는 실정이다. 현재 전력용 반도체는 대용량화, 고내압화 되는 산업 시스템의 핵심 부품으로 부각되고 있으며 냉장고, 세탁기, 청소기 등에는 인텔리전트 파워 IC 기술을 적용한 인버터가 이용되고 있고 최근 활발히 개발되고 있는 PDP(Plasma Display Panel)의 구동 IC 회로에 포함되는 등 다양한 가전제품에도 응용되고 있다. SIT(Static Induction Transistor)는 1970년대에 Ni-shizawa에 의해 처음 소개되어 현재 수 십 M μ 의 고주파 발전기나 증폭기 등에 이용되는 고속용 소자이다[1-3].

SIT는 접합게이트에 인가하는 전압에 의해 전

1. 극동대학교 정보통신학부

(충북 음성군 감곡면 왕장리 산 5)

2. 고려대학교 전기공학부

(서울시 성북구 안암동 5가 1)

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

접수일자 : 2004. 9. 2

1차 심사 : 2004. 11. 10

심사완료 : 2004. 12. 7

류를 제어하는 전압제어형 소자로서, 1952년에 Schockley에 의해 고안된 JFET과는 구조적 특징 및 작동원리가 유사하고, 차이점으로는 공간 전하에 의한 전류 제한을 들 수 있다. SIT는 다른 사이리스터에 비해 빠른 턴-오프와 100 kHz이상의 주파수를 가지고 동작을 할 수 있는 장점이 있으며, 고온에서도 안정하게 동작을 하는 장점을 가지고 있다. 작은 순방향 전압강하, 높은 블로킹 전압 특성 (약 700 V), 턴-오프 게이트 조절 능력을 가지고 있는 것이 특징이라 하겠다. 현재 주로 ADC, DAC 컨버터의 파워소스전환기로 많이 사용되고 있고, 펄스 제너레이터, AC 모터의 스피드 조절을 위해 사용되고 있다[4-7].

본 논문에서는 SIT의 블로킹 특성의 고압화를 기하기 위해 기존의 수직형 파워 SIT에 게이트와 소스 사이에 트렌치 산화막을 형성함으로써 개선된 구조를 제안하였고, 이 소자의 특성과 동작 원리를 검증하기 위해서 2차원 소자 시뮬레이터인 ISE-TCAD를 이용하여 소자의 전기적 특성을 분석·고찰 하였으며, 그 타당성을 검증하였다.

2. 소자의 구조 및 동작원리

그림 1(a)에서는 기존의 범용 전력 SIT의 구조를 보여주고 있다. 기판에 드레인 전극과 n^+ 층으로 구성되어 있고, 소자의 중앙에 n^+ 소오스 영역이 존재하며, 소오스 영역을 기준으로 양쪽에 게이트 영역이 존재한다. JFET와 마찬가지로 normally on 상태의 소자로서 게이트에 역바이어스를 인가하면 펀치 오프상태에 이르게 되면서, 전류는 포화 상태에 이르게 되어 그 동작원리는 JFET와 유사하다. 전력 SIT의 가장 중요한 파라미터로서 게이트 영역들과의 거리와 채널영역의 도핑레벨이고, 공핍모드 소자를 만들기 위해서 두 파라미터를 이용하여 게이트에 바이어스를 인가하지 않은 상태에서 공핍영역들이 서로 병합되지 않도록 조절을 해야 한다. 게이트에 바이어스를 걸어주지 않았을 때, 드레인과 소오스 사이의 전류의 흐름은 n -층에서의 저항에 의해 제한을 받는다. n -층의 영역은 2가지 영역으로 나눌 수 있는데, 하나는 채널 영역이고, 나머지는 드리프트 영역이다. 게이트 접합사이의 부분을 채널 영역, 게이트 접합 아래의 부분을 드리프트 영역이라 하며 두 영역에 해당하는 저항들을 포함한 전체 저항은 전류의 흐름에 크게 영향을 주게 된다.

게이트에 역바이어스를 걸어주면 게이트 접합의 공핍 영역이 점점 채널 영역으로 확장을 하게 된

다. 공핍영역은 자유캐리어가 걸려된 부분이기 때문에 게이트에 역바이어스를 더욱 증가를 시키게 되면 채널 영역의 저항은 증가를 하게 된다. 결국, 게이트 역바이어스를 통하여 게이트 접합 공핍영역을 변화시키고, 이를 통해 SIT의 저항을 변화시킨다. 채널 영역의 저항의 변화로 인해 SIT의 채널 전도성도 또한 변화를 하게 되는데, 저전압 신호치리에 SIT를 응용할 때에는 기생저항을 최소화하기 위해서 드리프트 영역을 작게 디자인하고, 고내압 소자에 응용을 하기 위해서는 넓은 드리프트 영역을 가져야 한다.

순방향 블로킹 모드에서 드레인 전압을 계속 증가를 시키게 되면, 게이트 접합 공핍 영역까지도 영향을 주게 되어 공핍 영역이 게이트 접합에서 드레인 방향으로 확장되어 진다. 그래서 드리프트 영역의 도핑농도와 두께는 반드시 드레인-게이트 전압에 의한 영향을 고려하여 설계되어야 한다.

본 논문에서 제안한 소자는 이러한 기존의 수직형 파워 SIT 구조를 바탕으로 순방향 블로킹 전압을 증가시키고자 트렌치 산화막과 구조적 변화를 통해 블로킹 특성을 개선을 하였다. 순방향 블로킹 전압은 소자의 설계 조건에 따라 변화시킬 수 있는 값으로써 전력 반도체 소자의 고내압화를 위해서는 이 순방향 블로킹 전압을 가능한 높게 설계해야 할 필요가 있다. 하지만 수직형 파워 SIT의 경우는 순방향 블로킹 특성을 개선시키면 순방향 전도특성은 낮아지는 트레이드-오프(trade-off) 관계이기 때문에 원하는 소자의 특성을 고려하여 소자를 설계를 하여야 한다. 소자 내에서 발생하는 펀치-스루(punch-through) 항복이 조금이라도 더 높은 전압 수준에서 발생하도록 만들기 위해 그림 1(b)와 그림 1(c)의 구조를 제시하였다. 그림 1(b)와 같이 제안한 수직형 파워 SIT의 동작원리는 기존의 수직형 파워 SIT와 동일하며 차이점은 트렌치 산화막을 형성시켜서 전계의 산화막 집중을 유도한 점과, 산화막 형성으로 인한 새로운 드리프트 영역을 추가한 점이다. 수직형 파워 SIT의 순방향 동작은 게이트에 바이어스를 인가하지 않은 상태에서 전자는 소스에서 출발하여 채널 영역과 드리프트 영역을 통과하여 드레인 전극으로 빠져나가는데, 채널 영역과, 드리프트 영역의 저항에 의해서 전자의 흐름이 제한을 받아 결국, 전류의 흐름을 제한하게 된다.

본 논문에서는 이미 제안한 트렌치 게이트 산화막 파워 SIT(모델 2)구조에서 소오스 트렌치 산화막을 추가로 형성시켜 전류의 경로를 늘리고, 산화막에 전계유도도를 통해 블로킹 특성을 개선하고자

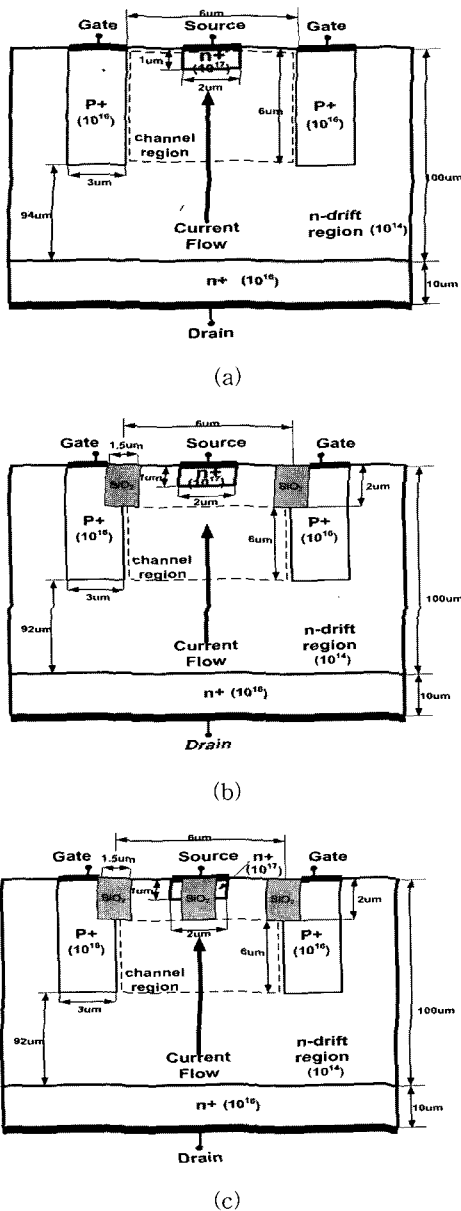


그림 1. 기존의 전력 SIT소자와 제안한 전력 SIT 소자의 구조.

- (a) 기존의 전력 SIT
- (b) 제안한 전력 SIT(모델 1)
- (c) 제안한 전력 SIT(모델 2)

Fig. 1. The Structures of the conventional SIT and the proposed SITs.

- (a) The conventional SIT
- (b) The proposed SIT(model 1)
- (c) The proposed SIT(model 2)

트렌치 게이트-소스 산화막 파워 SIT 소자를 제안하고, ISE-TCAD를 통해 순방향 블로킹 특성 향상을 위한 시뮬레이션을 하였다. 일반적으로 순방향 블로킹 전압을 크게 하기 위해서 사용되는 방법이 소자의 크기를 크게 하는 것이지만, 크기는 그대로 유지한 상태에서 트렌치 산화막을 소스의 쪽에 추가시켜 제안한 트렌치 게이트 산화막 파워 SIT(모델 2)보다 큰 로킹 전압을 얻는데 성공하였다. 기존에 소자에서 순방향 전도와 순방향 블로킹 특성에 영향을 미치는 파라미터인 채널 길이의 변화에서 채널 길이가 길어질수록 순방향 전도특성은 떨어지고, 순방향 블로킹 특성은 향상됨을 볼 수 있다.

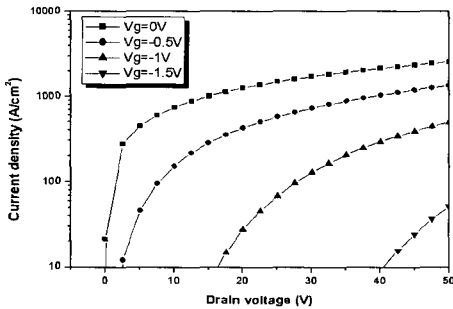
3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 2는 기존의 수직형 파워 SIT의 게이트 전압 변화에 따른 순방향 전도 특성과 순방향 블로킹 특성을 나타내고 있다. 순방향 전도특성은 게이트 전압을 0 V인 상태에서 기존의 수직형 파워 SIT와 제안한 트렌치 산화막 파워 SIT의 순방향 전도 특성을 비교하였고, 블로킹 특성은 게이트 전압을 -10 V를 인가한 상태에서 소스 전극과 외부적으로 쇼트시킨 후, 드레인에 인가하는 전압을 서서히 증가시키면서 소자의 순방향 블로킹 특성을 확인하는 방법을 사용하였다. 설계 및 공정파라미터를 최적화하고, 제안한 다른 소자에도 같은 룰을 적용하기 위해 선행시뮬레이션을 수행하였으며, 최적의 결과와 나온 파라미터를 제안한 소자에 적용하였다.

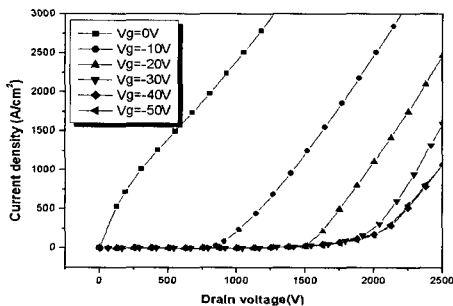
그림 3과 그림 4에 기존의 수직형 파워 SIT와 제안한 1차 모델 구조 및 제안한 2차 모델의 순방향 전도 특성을 비교하여 나타내었다. 순방향 전도 특성은 기존의 소자보다 낮은 특성을 가진 반면, 순방향 블로킹 특성은 가장 우수한 블로킹 전압을 가지는 것을 볼 수 있다. 소스의 쪽에 형성된 트렌치 산화막에 의해 전류 흐름 경로가 트렌치 산화막 너비만큼 우회하기 때문에 그만큼 전류 흐름 경로가 늘어남으로 인해 블로킹 전압이 향상됨으로 판단된다. 기존의 수직형 파워 SIT의 순방향 블로킹 전압은 게이트에 -10 V를 걸어주었을 경우, 약 700 V의 순방향 블로킹 전압 특성을 나타내었다. 제안된(1차 모델) 트렌치 게이트 산화막 파워 SIT의 경우에는 채널의 길이를 기존의 소자와 같이 6 µm로 유지하기 위해 산화막이 형성된

길이 만큼 게이트 영역의 길이를 $2\ \mu\text{m}$ 늘리고, 게이트 영역에 트렌치 산화막을 형성하였다. 결과적으로 제안한(1차 모델) 트렌치 게이트 산화막 파워 SIT의 순방향 블로킹 전압은 기존의 수직형 파워 SIT에 비해 약 1.5배 높은 1400 V의 순방향 블로킹 전압 특성을 얻을 수 있었다. 제안한 2차 모델인 트렌치 게이트-소스 산화막 파워 SIT는 1차 모델 구조에 소스쪽 트렌치 산화막을 추가로 형성시켜 전류의 흐름 경로를 증가시키고, 전위장벽의 높이를 증가시켜 1차 모델에 비해 약 120 V 높은 1520 V의 블로킹 전압을 얻을 수 있었다.

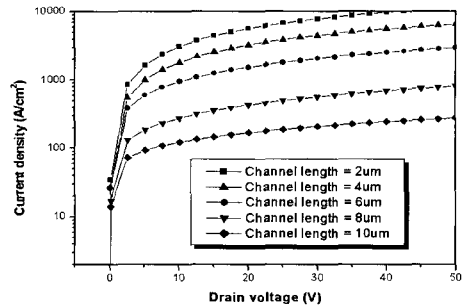
그림 5는 기존의 전력 SIT와 제안한 소자들의 2차원 전위분포를 보여주고 있다. 기존의 구조에서 발생하는 전계는 p-n 접합 부근에서 가장 높게 집중이 되고, 약 $3.48 \times 10^5\ \text{V/cm}$ 전계를 갖는다. 반면에 제안한 소자들의 경우는 p-n 접합 부근에서 약 $3.18 \times 10^5\ \text{V/cm}$ 정도로 가장 높게 전계가 집중이 되지만, 추가로 트렌치 게이트 산화막에서도 약 $6.8 \times 10^4\ \text{V/cm}$ 정도의 전계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 산화막 형성으로 인해 전계를 트렌치 산화막으로 유도하여 기존의 수직형 파워 SIT와 비교해서 제안한 모델이 p-n 접합에 보다 낮은 전계를 갖게 되었으리라 판단된다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 범용 전력 SIT의 전기적인 특성.

- (a) 순방향 전도특성
- (b) 순방향 블로킹 특성
- (c) 채널영역길이에 따른 I-V 특성

Fig. 2. The electrical characteristics of the conventional SIT.

- (a) The characteristic of the forward conduction
- (b) The characteristic of the forward blocking
- (c) The I-V characteristic of the length of the channel

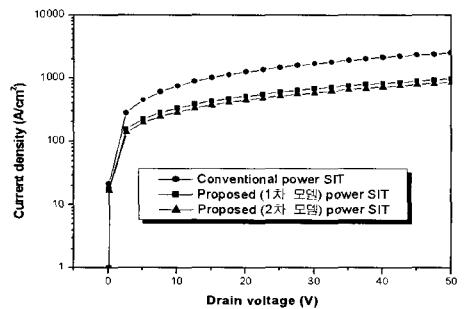


그림 3. 기존의 수직형 파워 SIT와 제안한(1차 모델) 트렌치 게이트 산화막 파워 SIT와 제안한(2차 모델)트렌치 게이트-소스 산화막 파워 SIT의 순방향 전도 특성 비교.

Fig. 3. Forward biased I-V characteristic in conventional vertical power SIT and proposed 1 model of power SIT with trench gate oxide and proposed 2 model of power SIT with trench gate-source oxide.

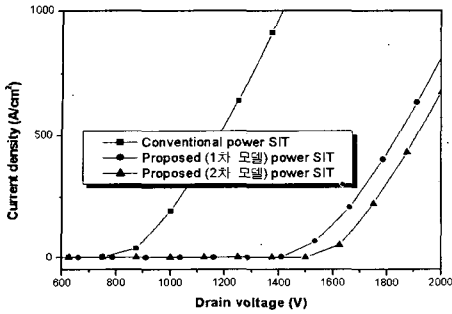


그림 4. 기존의 수직형 파워 SIT와 제안한(1차 모델) 트렌치 게이트산화막 파워 SIT와 제안한(2차 모델) 트렌치 게이트-소스 산화막 파워 SIT의 순방향 블로킹 특성 비교.

Fig. 4. Forward biased blocking characteristic in conventional vertical power SIT and proposed 1 model power SIT with trench gate oxide and proposed 2 model power SIT with trench gate-source oxide.

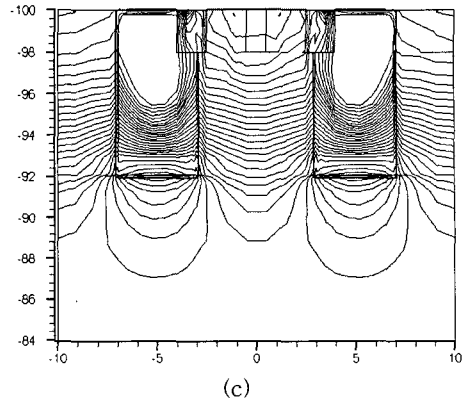
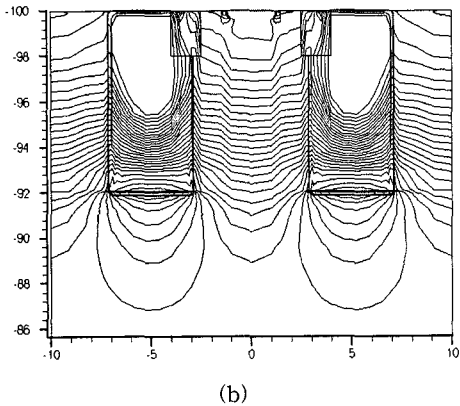
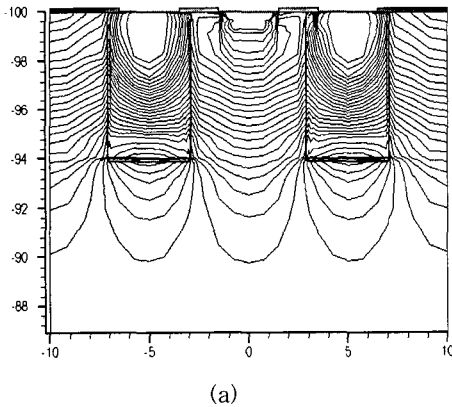


그림 5. 기존의 전력 SIT와 제안한 전력 SIT 모델의 2차원 전위분포.
(a) 기존의 전력 SIT의 전위분포
(b) 제안한 전력 SIT(모델 1)의 전위분포
(c) 제안한 전력 SIT(모델 2)의 전위분포

Fig. 5. The two dimensional potential distributions of the conventional power SIT and the proposed power SITs.
(a) The potential distribution of the conventional power SIT
(b) The potential distribution of the proposed power SIT(model 1)
(c) The potential distribution of the proposed power SIT(model 2)



4. 결 론

기존의 소자와 제안된 1차 모델 소자의 결과에 대해 비교해 보면 SIT 특성에 중대한 영향을 미치는 채널 영역의 길이를 같은 값으로 유지하여 비교를 하였기 때문에 순방향 블로킹 특성을 향상시키게 된 주 원인은 소자의 트렌치 산화막 형성이 크게 기인한 것과 게이트 산화막으로 인해 형성된 드리프트 영역으로 판단한다. 그리고 드리프트 영역의 형성으로 인해 순방향 전도특성은 기존의 비해 낮아지는 결과를 얻었는데, 이는 기존의 소자에서는 전류의 흐름에 제한을 주는 드리프트 영역의 저항과 채널 영역의 저항 뿐만 아니라 트렌치 산화막으로 인한 새로운 드리프트 영역의 저항이 포함되어져서 낮은 순방향 전도특성을 얻게 되었으리라 판단된다. 제안한 트렌치 산화막 파워 SIT는 같은 크기의 기존 수직형 파워 SIT에 비해 순방향 전도 특성은 낮아지지만, 크게 향상된 블로킹 특성

을 얻을 수 있었다. 기존의 수직형 파워 SIT는 760 V, 제안한 1차 모델 구조의 블로킹 전압은 1400 V을 얻었고, 제안한 2차 모델에서는 1520 V의 우수한 블로킹 전압을 얻을 수 있었으며, 유도 가열기나 SMPS등의 구동회로에 충분히 활용가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2004년 한국과학재단(R05-2004-000-11042-0)과 산업자원부 지역혁신사업(RIS)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] B. J. Baliga, "Evolution and status of smart power technology", Applied Power Electronics Conference and Exposition '92. Conference Proc. Vol. 1, p. 19, 1992.
- [2] Paolo Spirito, "Educational issues for power semiconductor devices", Microelectronics Journal 27, Vol. 1, p. 109, 1996.
- [3] 강이구, 오대석, 김대원, 김대중, 성만영, "인텔리전트 파워 IC의 구현을 위한 횡형 트렌치 전극형 IGBT의 제작 및 그 전기적 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 9호, p. 758, 2002.
- [4] 강이구, 김상식, 성만영, "효율적인 p+ 다이버터를 갖는 수평형 트렌치 전극형 IGBT의 제작에 따른 전기적 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 9호, p. 750, 2002.
- [5] 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.
- [6] J. I. Nishizawa, Fellow, IEEE, Kaoru Motoya, Member, IEEE, and Akira Itoh, "The 2.45 GHz 36 W CW Si recessed gate type SIT with high gain and high voltage operation", IEEE Transactions on electron devices, Vol. 47, No. 2, p. 355, 2000.
- [7] 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. EEM, Vol. 2, No. 3, p. 33, 2001.