

논문 20-5-4

트렌치 게이트 IGBT 에서의 공정 및 설계 파라미터에 따른 항복 전압 특성에 관한 연구

A Study on the Breakdown Voltage Characteristics with Process and Design Parameters in Trench Gate IGBT

신호현¹, 이한신¹, 성만영^{1,a}
(Ho Hyun Shin¹, Han Sin Lee¹, and Man Young Sung^{1,a})

Abstract

In this paper, effects of the trench angle(θ) on the breakdown voltage according to the process parameters of p-base region and doping concentrations of n-drift region in a Trench Gate IGBT (TIGBT) device were analyzed by computer simulation. Processes parameters used by variables are diffusion temperature, implant dose of p-base region and doping concentration of n-drift region, and aspects of breakdown voltage change with change of each parameter were examined. As diffusion temperature of the p-base region increases, depth of the p-base region increases and effect of the diffusion temperature on the breakdown voltage is very low in the case of small trench angle(45°) but that is increases 134.8 % in the case of high trench angle(90°). Moreover, as implant dose of the p-base region increases, doping concentration of the p-base region increases and effect of the implant dose on the breakdown voltage is very low in the case of small trench angle(45°) but that is increases 232.1 % in the case of high trench angle(90°). These phenomenons is why electric field concentrated in the trench is distributed to the p-base region as the diffusion temperature and implant dose of the p-base increase. However, effect of the doping concentration variation in the n-drift region on the breakdown voltage varies just 9.3 % as trench angle increases from 45° to 90° . This is why magnitude of electric field concentrated in the trench changes, but direction of that doesn't change. In this paper, respective reasons were analyzed through the electric field concentration analysis by computer simulation.

Key Words : Insulated gate bipolar transistor, IGBT, Breakdown voltage, Trench, Trench gate IGBT

1. 서 론

전력용 반도체 소자는 현재 수많은 전기전자 제품에 전력공급 및 스위칭 용도로 사용되고 있으며, 그 전기적 특성을 향상 시키고자 하는 연구가 국내외 여러 연구기관에서 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 전력용 반도체 소자 중 절연 게이트 바이폴

라 트랜지스터 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 소자는 높은 전류 용량 및 빠른 스위칭 특성 때문에 최근 여러 산업 분야에서 각광을 받고 있다[4]. 전력용 반도체 소자는 높은 전압 환경에서 동작하기 때문에 고압에 대한 전기적 내성이 강해야 하고 소자 동작 시에는 소자 자체의 전력 소모가 작아야 한다. IGBT의 온상태 저항을 최소화하기 위하여 게이트의 구조를 트렌치 형태로 하는 트렌치 게이트 IGBT (trench gate IGBT, TIGBT) 가 제안되었으나 트렌치 모서리 부위에 집중되는 전계 때문에 항복전압이 감소하는 문제점이 발생하였고 이러한 문제를 극복하고자 하는

1. 고려대학교 전기공학부

(서울시 성북구 안암동 5가 1)

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

접수일자 : 2007. 4. 2

심사완료 : 2007. 4. 18

표 1. 파라미터 값.

Table 1. Parameter values.

P형 베이스 영역의 확산 온도(°C)	1040	1070	1100
P형 베이스 영역의 도즈량(/cm ²)	0.2×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	5.0×10 ¹⁴
N형 드리프트 도핑농도(/cm ³)	0.5×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	2.0×10 ¹⁴

연구가 활발히 진행되어 왔다[5,6]. 본 논문에서는 트랜치에 집중되는 전계에 영향을 미치는 여러 공정 파라미터를 설정하여 각각의 파라미터가 트랜치의 모양, 즉 트랜치 모서리의 각도에 따라 어떻게 영향을 받는지 소자 구조 설계용 시뮬레이터인 TSUPREM4와 소자 분석용 시뮬레이터인 MEDICI를 이용하여 분석하였다.

본 논문에서 설정한 공정 파라미터는 P형 베이스(p-base) 또는 베이스 영역의 확산 온도, 도즈량, N형 드리프트(n-drift) 또는 드리프트 영역의 도핑농도이며 각 파라미터의 변수는 표 1에 나타내었다.

본 논문에서 사용한 TIGBT 구조는 그림 2와 같으며 캐리어의 수명시간(lifetime)은 7 μs, 게이트 산화막의 두께는 0.1 μm 로 설계하였다. 트랜치 각도를 그림에서처럼 θ로 정의하였고 θ가 45°, 60°, 75°, 90° 인 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 P형 베이스 영역의 확산 온도에 따른 항복전압 변화

P형 베이스 영역의 깊이가 트랜치 모양에 따라 항복전압에 미치는 영향을 알아보기 위하여 베이스 영역의 확산 온도를 변화시키며 트랜치 각도에 따른 항복전압의 변화 양상을 살펴보았다. 표 2는 확산 온도에 따른 베이스 영역의 깊이를 나타낸 것이며 시뮬레이션시 베이스 영역의 도즈량은 1.0×10¹⁴ /cm², N형 드리프트 영역의 도핑농도는 1.0×10¹⁴ /cm³ 로 고정하였다.

P형 베이스 영역의 확산온도에 따른 항복전압 특성의 시뮬레이션 결과는 그림 2와 같다. 확산 온도가 높을수록 항복전압은 상승하며 트랜치의 각도가 증가 할수록 항복전압은 떨어지는 것을 알 수 있다. 트랜치 각도가 45°일 때에는 그림 2의 (a)에 표시한 것처럼 확산 온도의 증가에 따른 항복전압 변화량은 $\frac{\Delta BV}{\Delta T_{diff}} = \frac{0.78 V}{1^{\circ}C}$ 이었지만 각도가

표 2. 확산 온도에 따른 P형 베이스 영역의 깊이.

Table 2. Depth of the p-base region with the various diffusion temperature.

확산 온도(°C)	1040	1070	1100
P형 베이스 영역의 깊이(μm)	2.65	3.38	4.48

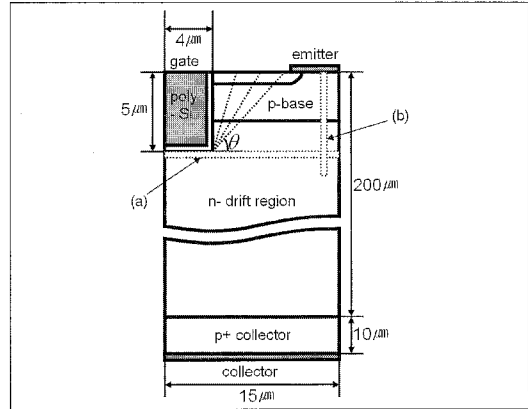


그림 1. 소자 구조.

Fig. 1. Device structure.

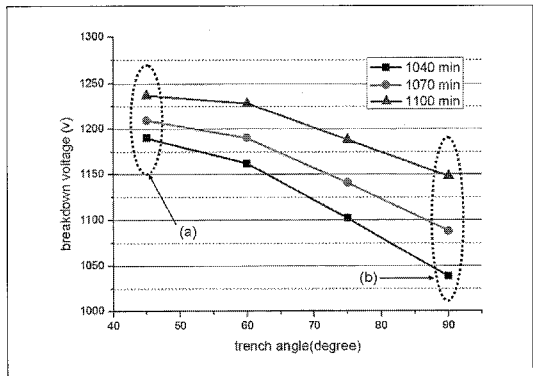


그림 2. P형 베이스 영역의 확산 온도에 따른 항복전압 변화.

Fig. 2. Breakdown voltage variations with the various diffusion temperatures of the p-base region.

90°인 경우에는 그림 2의 (b)에 표시한 바와 같이 $\frac{\Delta BV}{\Delta T_{diff}} = \frac{1.83 V}{1^{\circ}C}$ 으로 각도가 45° 일 때보다 변화

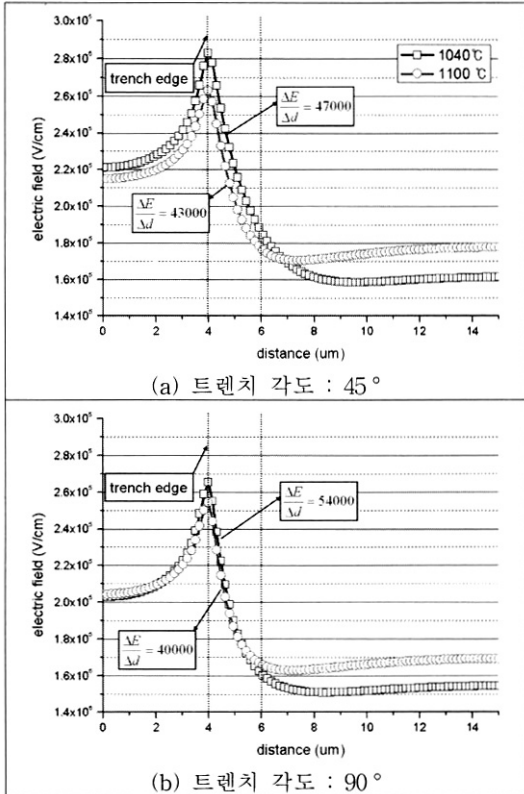


그림 3. P형 베이스 영역의 확산 온도와 트렌치 각도 변화에 따른 전계 분포.

Fig. 3. Electric field distributions with the various diffusion temperatures of the p-base region and trench angles.

량이 134.6 % 증가하였다. 따라서, P형 베이스 영역의 확산 온도는 트렌치의 각도가 낮을 때보다 높은 경우에 항복전압에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

위에서 살펴본 결과의 자세한 분석을 위하여 트렌치 각도에 따라 모서리 부위(그림 1의 (a))에서의 전계를 살펴보았으며 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 트렌치 부위에서의 전계의 집중도를 알아보기 위하여 소자의 수평방향 거리 4 μm 에서 6 μm 사이에서의 전계의 기울기($\frac{\Delta E}{\Delta d}$)를 살펴보았다. 기울기가 급할수록 전계가 트렌치 부분에 많이 집중되어 있음을 의미한다. 트렌치 각도가 45°일 때에는 P형 베이스 영역의 확산 온도가 감소함에 따라 전계의 기울기가 43000에서 47000으로 $\frac{4000 \text{ V/cm}}{1\mu\text{m}}$

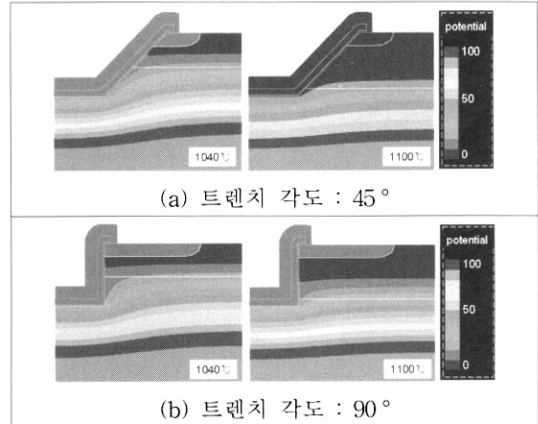


그림 4. P형 베이스 영역의 확산 온도와 트렌치 각도 변화에 따른 등전위 곡선.

Fig. 4. Potential contours with the various diffusion temperatures of the p-base region and trench angles.

증가하였으나 트렌치 각도가 90°인 경우에는 전계의 기울기가 40000에서 54000으로 $\frac{14000 \text{ V/cm}}{1\mu\text{m}}$ 증가하였다. 이것으로부터 트렌치 각도가 증가하면 베이스 영역의 깊이가 작아짐에 따라 트렌치 방향으로 전계집중도가 증가하여 항복전압이 크게 감소하는 것을 알 수 있다[7].

트렌치 각도가 증가함에 따라 P형 베이스 영역의 확산온도가 트렌치 부근의 전계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 트렌치 부근에서의 등전위 곡선을 시뮬레이션을 통해 살펴 보았다. 그림 4는 트렌치 각도가 45°, 90°일 때, 베이스 영역의 확산 온도가 각각 1040 °C, 1100 °C 인 경우의 등전위 곡선을 나타낸 그림이다. 그림 4(a) 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 낮은 경우에는 P형 베이스 영역의 확산온도가 낮아 베이스 영역의 깊이가 작은 경우나 확산온도가 높아 베이스 영역의 깊이가 큰 경우 모두 등전위 곡선이 충분히 수평으로 형성되어 있어 확산온도 증가에 따른 트렌치 모서리 방향으로의 전계 집중 완화효과는 크지 않다. 그러나 그림 4(b) 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 큰 경우, P형 베이스 영역의 확산온도가 낮아 베이스 영역의 깊이가 작으면 등전위 곡선이 많이 굽게 되며 확산온도가 높아 베이스 영역의 깊이가 깊어지면 등전위 곡선이 많이 퍼지게 되는데 이는 N형 드리프트 영역에서 트렌치 모서리 방향으로 향하던 전계가 베이스 영역의 방향으로 분산되기 때문으로 판단된다[8].

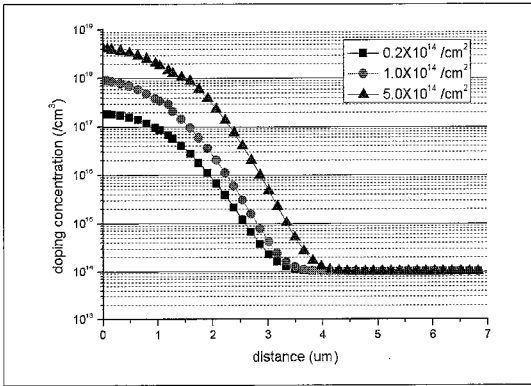


그림 5. P형 베이스 영역 도즈량에 따른 도핑 농도 분포.

Fig. 5. Doping concentration distributions with various implant doses of the p-base region.

2.2 P형 베이스 영역의 도즈량에 따른 항복전압 변화

트렌치 각도 변화에 따른 P형 베이스 영역 도핑 농도의 항복전압에 대한 영향을 평가하기 위하여 P형 베이스 영역의 도즈량을 변화시키면서 항복전압을 알아보았다. 그림 5는 P형 베이스 영역의 도즈량에 따라 그림 1의 (b)에서 베이스 영역의 도핑 농도 분포를 나타낸 그래프이며 시뮬레이션시 P형 베이스 영역의 확산 온도는 1070 °C, N형 드리프트 영역의 도핑농도는 1.0x10¹⁴ /cm³ 로 고정하였다.

그림 6은 P형 베이스 영역의 도즈량에 따른 항복전압 시뮬레이션 결과를 나타낸 그림으로, 베이스 영역의 도즈량이 증가 할수록 항복전압은 증가하고 트렌치 각도가 증가할수록 항복전압은 감소하는 것을 보여준다. 트렌치 각도가 45°일 때에는 그림 6의 (a)에 표시한 바와 같이 베이스 영역의 도즈량 변화에 따른 항복전압 변화량은 $\frac{\Delta BV}{\Delta N_{dose}} = \frac{5.21 V}{1 \times 10^{-14} / cm^2}$ 이며 각도가 90°인 경우에는 그림 6의 (b)에 표시한 바와 같이 베이스 영역의 도즈량 변화에 따른 항복전압의 변화량은 $\frac{\Delta BV}{\Delta N_{dose}} = \frac{17.3 V}{1 \times 10^{14} / cm^2}$ 로 트렌치 각도가 45°일 때 보다 232.1 % 증가하였다. 위 결과로부터 트렌치 각도가 크면 P형 베이스 영역의 도핑농도의 증가에 따른 항복전압의 증가량은 더 큰 것을 알 수 있다.

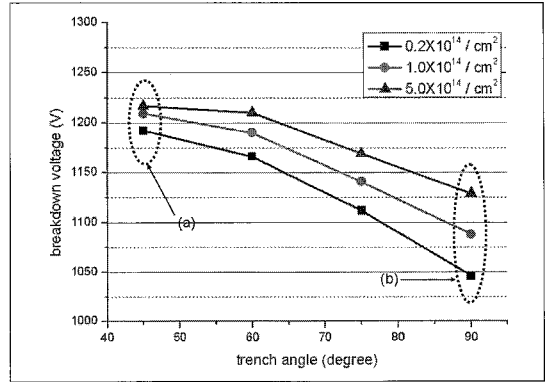


그림 6. P형 베이스 영역의 도즈량에 따른 항복전압.

Fig. 6. Breakdown voltage variations with various implant doses of the p-base region.

앞에서 살펴본 시뮬레이션 결과의 원인을 살펴보기 위하여 그림 1의 (a) 영역에서 전계를 알아보았으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 45°인 경우에는 P형 베이스 영역의 도즈량 감소에 따른 4 μm ~ 6 μm 사이에서는 전계의 기울기가 47000에서 48500으로 $\frac{1500 V/cm}{1 \mu m}$ 증가하였지만 트렌치 각도가 90°인 경

우에는 45000에서 52500으로 $\frac{7500 V/cm}{1 \mu m}$ 증가하였다. 이로써 트렌치 각도가 클수록 P형 베이스 영역의 도핑농도가 작아짐에 따라 트렌치 방향으로 전계집중도가 더욱 커져 항복전압이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

트렌치 각도가 증가함에 따라 P형 베이스 영역의 도즈량이 트렌치 부근의 전계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 트렌치 부근에서의 등전위 곡선을 시뮬레이션을 통해 살펴 보았다. 그림 8은 트렌치 각도가 45°, 90°일 때, 베이스 영역의 도즈량이 각각 0.2x10¹⁴ /cm², 5.0x10¹⁴ /cm² 인 경우의 등전위 곡선을 나타낸 그림이다. 그림 8(a) 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 낮은 경우에는 P형 베이스 영역의 도즈량이 낮아 베이스 영역의 도핑농도가 낮은 경우나 도즈량이 높아 베이스 영역의 도핑농도가 높은 경우 모두 등전위 곡선이 충분히 수평으로 형성되어 있어 도즈량 증가에 따른 트렌치 모서리 방향으로의 전계 집중 완화효과는 크지 않다. 그러나 그림 8(b) 그림에서 볼 수 있듯이 트

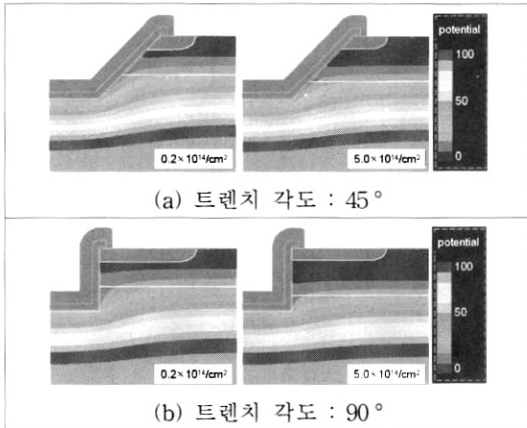


그림 8. P형 베이스 영역의 도즈량과 트렌치 각도 변화에 따른 등전위 곡선.

Fig. 8. Potential contours with various implant doses of the p-base region and trench angles.

트렌치 각도가 큰 경우, P형 베이스 영역의 도즈량이 낮아 베이스 영역의 도핑농도가 낮으면 등전위 곡선이 많이 좁게 되며 도즈량이 높아 베이스 영역의 도핑농도가 높아지면 등전위 곡선이 많이 퍼지게 되는데 이는 N형 드리프트 영역에서 트렌치 모서리 방향으로 향하던 전계가 P형 베이스 영역의 방향으로 분산되기 때문으로 판단된다. 이것으로부터 트렌치 각도가 크면 P형 베이스 영역의 도즈량 증가에 따른 전계 집중 완화효과는 매우 커지는 것을 알 수 있다.

2.3 N형 드리프트 영역 도핑농도에 따른 항복 전압 변화

N형 드리프트 영역의 도핑농도가 트렌치 모양에 따라 항복전압에 미치는 영향을 알아보기 위하여 N형 드리프트 영역의 도핑농도를 변화시키며 트렌치 각도에 따른 항복전압을 알아보았다. 그림 9는 시뮬레이션 결과를 나타내는 그래프로 N형 드리프트의 도핑농도가 증가함에 따라 항복전압은 감소하고, 트렌치 각도가 증가함에 따라 항복전압이 감소는 것을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 트렌치의 각도가 45° 일 때 도핑농도 감소에 따른 항복전압의 증가량은 그림 9의 (a)에 표시한 바와 같이 $\frac{\Delta BV}{\Delta N_{drift}} = \frac{430V}{1 \times 10^{14}/cm^3}$ 이고, 트렌치 각도가 90°인 경우는 그림 9의 (b)에 표시한 바와 같이 항복

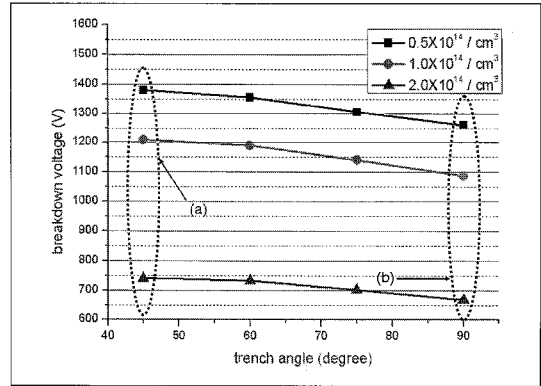


그림 9. N형 드리프트 영역의 도핑농도에 따른 항복전압.

Fig. 9. Breakdown voltage variations with various doping concentrations of the n-drift region.

전압의 증가량은 $\frac{\Delta BV}{\Delta N_{drift}} = \frac{390V}{1 \times 10^{14}/cm^3}$ 이다. 트렌치 각도가 증가하여도 항복전압 증가량의 변화율은 9.3 % 로 매우 작음을 알 수 있다. 위 결과로부터 N형 드리프트 영역의 도핑농도가 항복전압에 미치는 양상은 트렌치 각도에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

위에서 살펴본 결과에 대해 원인을 살펴보기 위하여 트렌치 아래 영역에서의 전계분포를 살펴 보았다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 45°인 경우 전계의 기울기 차이는 $\frac{18000V/cm}{1\mu m}$ 이고

90°인 경우에는 $\frac{20000V/cm}{1\mu m}$ 이다. 즉, 트렌치 각도가 변하더라도 4~6 μm 사이에서의 전계의 기울기의 차이는 거의 같은 것을 알 수 있다. 이것은 N형 드리프트 영역의 도핑농도가 항복전압에 미치는 양상은 트렌치 각도에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

트렌치 각도가 증가함에 따라 N형 드리프트 영역의 도핑농도가 트렌치 부근의 전계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 트렌치 부근에서의 등전위 곡선을 시뮬레이션을 통해 살펴 보았다. 그림 11은 트렌치 각도가 45°, 90°일 때, N형 드리프트 영역의 도핑농도가 각각 0.5x10¹⁴/cm³, 2.0x10¹⁴/cm³인 경우의 등전위 곡선을 나타낸 그림이다. 그림 11(a) 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 낮은

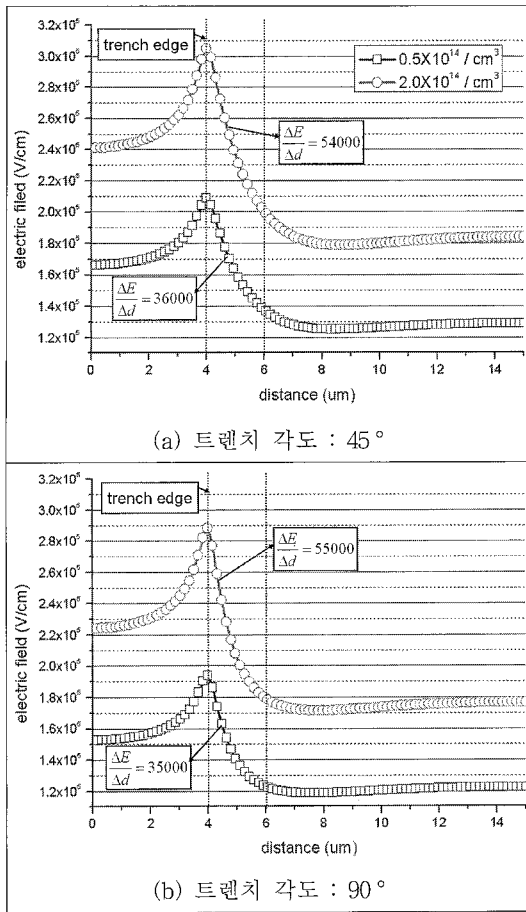


그림 10. N형 드리프트 도핑농도와 트렌치 각도 변화에 따른 전계 분포.
 Fig. 10. Electric field distributions with various doping concentrations of the n-drift region and trench angles.

경우에는 N형 드리프트 영역의 도핑농도가 낮은 경우나 높은 경우 모두 등전위 곡선이 충분히 수평으로 형성되어 있어 N형 드리프트 영역의 도핑농도 증가에 따른 트렌치 모서리 방향으로의 전계 집중 양상은 비슷하다. 그림 8(b) 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 각도가 큰 경우에도 N형 드리프트 영역의 도핑농도가 낮은 경우나 높은 경우 모두 등전위 곡선이 굽어있는 모양은 비슷하다. 이는 N형 드리프트 영역에서 트렌치 또는 P형 베이스 영역의 방향으로 향하는 전계가 드리프트 영역의 도핑농도가 변하더라도 전계의 양은 변하지만 그 방향은 거의 일정하기 때문으로 판단된다.

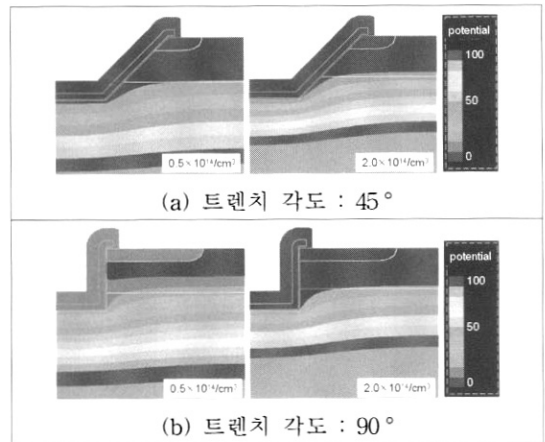


그림 11. N형 드리프트 도핑농도와 트렌치 각도 변화에 따른 등전위 곡선.
 Fig. 11. Potential contours with various doping concentrations of the n-drift region and trench angles.

3. 결론

본 논문에서는 트렌치 게이트 IGBT의 항복전압 특성을 분석함에 있어 P형 베이스 영역의 확산 온도 및 도즈량, N형 드리프트 영역의 도핑농도가 트렌치의 모양에 따라 항복전압에 미치는 영향도를 분석하였다. 그 결과 P형 베이스 영역의 확산 온도에 의한 깊이, 도즈량에 의한 도핑 농도 분포가 항복전압에 미치는 영향은 트렌치의 모양에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 앞에서 알아본 시뮬레이션 결과로부터 트렌치 게이트 IGBT 설계시 항복전압을 높이려면 스레쉬홀드 전압 (threshold voltage) 등과 같은 소자의 원하는 전기적 특성 범위 내에서 트렌치의 각도가 높을수록 P형 베이스 영역의 확산 온도와 도핑 농도를 증가시켜 트렌치에 집중되는 전계를 P형 베이스 영역의 방향으로 분산시켜야 함을 알 수 있었다. 그러나 트렌치 각도가 작으면 P형 베이스 영역의 깊이나 도핑농도가 항복전압에 미치는 영향이 작아지므로 항복전압 특성보다는 온상태 전압강하나 레치업 특성 향상을 위해 P형 베이스 영역의 깊이나 도핑농도를 조절하는 것이 더 효율적이라고 할 수 있다.

본 연구 결과는 향후 고압용 트렌치 게이트 IGBT 설계에 있어 공정 파라미터 결정에 영향을 미칠 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부 전력IT 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- [1] 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, No. 2, p. 295, 2002.
- [2] E. G. Kang, S. S. Kim, and M. Y. Sung, "The electrical characteristics of the fabricated lateral trench electrode IGBT for intelligent power IC", *International Journal for Manufacturing Science and Production*, Vol. 4, No. 4, p. 189, 2002.
- [3] M. Y. Sung, E. G. Kang, D. J. Kim, and S. S. Kim, "A new lateral trench electrode insulated gate bipolar transistor with p+ diverter for superior electrical characteristics", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 4B, p. 2119, 2003.
- [4] B. Jayant Baliga, Michael S. Adler, Robert F. Love, Peter V. Gray, and Nathan D. Zommer, "The insulated gate transistor: a new three-terminal MOS-controlled bipolar power device", *Trans. on Electron Devices*, Vol. 31, No. 6, p. 821, 1984.
- [5] J.-S. Lee, E.-G. Kang, and M.-Y. Sung, "Improvement of electrical characteristics of vertical NPT trench gate IGBT using trench emitter electrode", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 19, No. 10, p. 912, 2006.
- [6] M. Nemoto and B. J. Baliga, "The recessed-gate IGBT structure", *proc. of the ISPSD '99*, p. 149, 1999.
- [7] P. M. Campbell, W. Garwacki, A. R. Sears, P. Mmenditto, and B. J. Baliga, "Trapezoidal-groove schottky-gate vertical-channel GaAs FET (GaAs static induction transistor)", *Electron Device Letters*, Vol. 6, No. 6, p. 304, 1985.
- [8] D. W. Kim, M. Y. Sung, and E. G. Kang, "A dual trench gate emitter switched thyristor (DTG-EST) with dual trench gate electrode and different gate oxide thickness", *Microelectronic Engineering*, Vol. 70, No. 1, p. 50, 2003.