

## Lifetime Control을 이용한 IGBT의 스위칭 특성 개선

Improvement on Switching Characteristics  
of IGBT by Means of Lifetime Control李世揆\* · 鄭相九\*\*  
(Se-kyu Lee · Sang-Koo Chung)

**Abstract** - Improvement on the switching characteristic of IGBT by means of the uniform and local lifetime control is studied numerically using two-dimensional simulator, MEDICI. In the case of uniform lifetime control, the on-state and switching characteristics are simulated as a function of lifetime, and compared with the experimental results reported, which allows a relationship between dose of electron irradiation and controlled lifetime. In the case of local lifetime control, simulations are carried out by varying the position, width, and lifetime of the locally controlled region, and the results are compared with the characteristics for the case of the uniform lifetime control. The turn-off time of the device with an optimized locally controlled region is found to decrease from about  $4.5\mu\text{s}$  to  $0.11\mu\text{s}$  while the forward voltage drop increases from 1.37V to 2.61V in comparison with that for the uniform lifetime control.

**Key Words** : IGBT, 스위칭 특성, lifetime control, simulation

## 1. 서 론

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 바이폴라 접합 트랜지스터의 높은 전류특성과 MOSFET의 빠른 스위칭 특성을 결합시킨 소자로서, 주로 600V 이상의 고전압용에서 MOSFET를 점차 대체해 나가고 있는 추세에 있다. 온-상태 일 때 애노드로부터 에피영역으로 주입된 많은 양의 소수 캐리어(minority carrier)는 고주입(high-level injection)에 의한 전도도 변조(conductivity modulation)로 인해 순방향 전압강하를 급격히 낮추어 주는 장점이 있는 반면, 턴-오프 시 캐소드를 통해서 빠져나가야 하므로 MOSFET에 비해 턴-오프 시간이 길어지는 단점을 갖고 있다[1]. IGBT의 스위칭 특성을 개선시키는데 사용되는 방법에는 에피영역 전체에 전자를 조사하여 소수 캐리어 수명을 균일하게 조절하는 방법 [2][3]과 중성자, 양자를 국부적으로 조사하여 소수 캐리어 수명을 국부적으로 조절하는 방법[4][5]이 있다. 그러나 전자의 경우 전자조사량과 캐리어의 수명간의 관계가 명백하게 알려지지 않고 있으며, 후자의 경우에는 수명조절 영역의 위치,

두께, 소수 캐리어 수명에 대한 최적화가 부분적으로 이루어 지기는 했지만[6], 완전하지 않아서 주로 실험에 의존하고 있다.

본 논문에서는 논-펀치드루(Non-Punch-Through, NPT)구조와 펀치드루(Punch-Through, PT)구조에 대하여 소수 캐리어 수명조절이 IGBT의 순방향과 스위칭 특성에 미치는 영향을 2차원 시뮬레이터, MEDICI를 이용하여 조사하였고, 수명조절이 전체 에피영역에서 균일하게 생기는 경우에 보고된 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 수명조절을 위한 전자조사량과 조정수명간의 관계를 나타내었다. 국부적인 수명조절의 경우에는 수명조절 영역의 위치, 두께 및 소수 캐리어 수명에 따른 스위칭 특성을 조사하고, 그 결과를 균일한 수명조절의 경우와 비교하였으며, 이 경우 국부적인 수명조절로써 순방향 전압강하와 턴-오프 시간을 목표치에 맞도록 조정할 수 있음을 밝혔다.

## 2. 균일한 소수 캐리어 수명조절

전자조사를 통한 균일한 소수 캐리어 수명조절이 IGBT의 순방향 및 스위칭 특성에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 조사하였다. 그림 1에 시뮬레이션에 사용된 PT-IGBT의 단면도를 나타내었으며,  $p^+$  층 다음의  $n^+$  버퍼층이 없는 경우가 NPT 구조이다. 표 1에 각 경우의 시뮬레이션에 사용된 변수들로 해석식[1]에 의한 2500V급 IGBT에서 표준적인 값

\* 準 會 員 : 亞洲大 大學院 電子工學科 碩士

\*\* 正 會 員 : 亞洲大 電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 31日

最終完了 : 2000年 2月 14日

들이다. 시뮬레이션 상에서 순방향 전압강하는 애노드의 전류밀도가  $100A/cm^2$  일 때의 애노드 전압이며, 턴-오프 시간은 애노드 전류밀도가 온-상태 값의 10%로 감소할 때까지의 시간으로 결정하였다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 변수

Table 1 Device Parameters used in Simulation

변 수	값	
	NPT-IGBT	PT-IGBT
n- 에피 농도	$4 \times 10^{13}/cm^3$	$2 \times 10^{13}/cm^3$
n- 에피 두께	270 $\mu m$	150 $\mu m$
p+ 베이스 접합깊이	5 $\mu m$	5 $\mu m$
p+ 베이스 접합깊이	3 $\mu m$	3 $\mu m$
게이트 길이	25 $\mu m$	25 $\mu m$
게이트 산화막 두께	500 Å	500 Å
p+ 애노드 농도	$3 \times 10^{18}/cm^3$	$3 \times 10^{18}/cm^3$
p+ 애노드 두께	30 $\mu m$	30 $\mu m$
n+ 버퍼 농도	-	$2 \times 10^{16}/cm^3$
n+ 버퍼 두께	-	20 $\mu m$

전자가 조사될 경우 조사 에너지는 전자가 투과되는 깊이를 결정하며, dose 양은 실리콘 영역에 생성되는 재결합 센터의 수를 결정하게 된다. 조사 에너지를 일정하게 하고 dose 양을 증가시키면, 에피영역에 생성되는 재결합 센터의 수가 증가하여 소수 캐리어 수명이 감소하게 되는 것이다.

그림 2에 에피영역의 소수 캐리어 수명( $\tau_U$ )을 0.1(□), 1(○), 10 $\mu s$ (△)로 변화시켰을 경우 에피영역의 소수 캐리어인 정공의 분포를 나타내었다. 점선은 수직방향의 불순물 농도를 나타낸다. 소수 캐리어의 농도가 불순물 농도보다 월등히 크므로 전도도 변화가 발생했음을 확인할 수 있다. NPT와 PT-IGBT 모두 소수 캐리어 수명이 증가할수록 에피영역의 소수 캐리어의 농도가 증가한다. 이 높은 농도의 소수 캐리어는 순방향 전압강하를 낮추는 역할을 하는 반면, 턴-오프 특성을 나쁘게 하는 단점이 있다. 각 경우 턴-오프 애노드 전류와 전압의 파형을 그림 3에 나타내었다. 소수 캐리어 수명이 증가할수록 캐소드를 통해서 빠져나가야 할 에피영역의 소수 캐리어의 농도가 높아지기 때문에 턴-오프 시간이 길어진다는 것을 알 수 있다.

그림 4(a)에 에피영역의 소수 캐리어 수명을 50 $\mu s$ 로부터 10, 5, 1, 0.5 및 0.1 $\mu s$ 로 감소시킬 때 수명변화에 따른 순방향 전압강하와 턴-오프 시간사이의 trade-off 관계를 나타내었다. 두 구조 모두 소수 캐리어 수명이 감소할수록 에피영역 내의 소수 캐리어의 농도가 감소하여 애노드로부터 주입되어 에피영역을 지나는 소수 캐리어의 농도가 감소하므로 턴-오프 시간이 짧아지고, 순방향 전압강하가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(b)에 이상의 시뮬레이션 결과를 기존의 실험결과[7]와 비교하여 나타내었다. 실험결과(■)는 항복전압이 600V급인 PT-IGBT를 4MeV의 에너지로 1, 4, 8Mrad의 dose의 전자를 조사하여 수명조절을 한 경우이며, 시뮬레이션(○)은 농도가  $5 \times 10^{13}/cm^3$ , 두께가 30 $\mu m$ 인 에피영역 및 20 $\mu m$  두께의 버퍼층을 갖는 600V급의 PT-IGBT를 사용하였고, 나머지 변수들은 표 1과 같다. 시뮬레이션 결과가 실험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, 소수 캐리어 수명이 전자를 조사하지 않았을 경우 약 5 $\mu s$ 이며 1, 4, 8Mrad의 전자조사량에 따라 소수 캐리어 수명이 대략 1, 0.3, 0.1 $\mu s$ 으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 전자조사량과 캐리어 수명간의 관계를 나타내는 지표로서 전자조사에 의한 수명조절에 중요한 의미를 갖는다.

### 3. 국부적인 소수 캐리어 수명조절

중성자나 양성자 조사를 통한 국부적인 소수 캐리어 수명조절은 에피영역 전체의 소수 캐리어 수명은 감소하지 않고 일정 영역의 소수 캐리어 수명만 감소하므로, 전자조사의 경우에 비해 순방향 전압강하가 약간 증가하면서 턴-오프 시간이 급격히 줄어드는 장점을 갖고 있다. 시뮬레이션에 사용된 변수는 표 1과 같으며, 에피영역의 소수 캐리어 수명( $\tau_U$ )을 고정시키고, 게이트 산화막으로부터 수명조절 영역까지의 거리(d), 수명조절 영역의 두께(w)와 소수 캐리어 수명( $\tau_L$ )을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과, 수명조절 영역의 위치가 IGBT의 특성에 미치는 영향은 NPT-IGBT 및 PT-IGBT의 경우 모두 수명조절 영역이 애노드의 경계면에 위치하는 경우 턴-오프 시간이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수명조절 영역을 지나면서 소수 캐리어의 농도가 급격히 감소하기 때문이다.

수명조절 영역의 두께가 IGBT의 특성에 미치는 영향은 NPT와 PT-IGBT 모두 수명조절의 두께가 증가함에 따라서 순방향 전압강하가 약간 증가하고 턴-오프 시간이 약간 감소하기는 하지만, 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 이후의 모든 시뮬레이션에서는 수명조절 영역의 위치는 애노드 경계면으로 하고 두께를 20 $\mu m$ 로 고정하였다.

$\tau_U$ 를  $5\mu s$ 로 고정시키고, 수명조절 영역의 캐리어 수명,  $\tau_L$ 을  $0.2(\square)$ ,  $0.4(\circ)$ ,  $0.6(\triangle)$ ,  $0.8(\nabla)$ ,  $1\mu s(\diamond)$ 로 변화시키면서  $\tau_L$ 이 IGBT의 특성에 미치는 영향을 조사하여 에피영역 전체의 소수 캐리어 수명이  $5\mu s$ 로 균일한 경우(■)와 비교한 결과,  $\tau_L$ 이 감소함에 따라서 수명조절 영역을 지나서 에피영역으로 주입되는 소수 캐리어의 농도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 소수 캐리어의 농도가 감소함에 따라서 순방향 전압강하가 다소 증가하지만, 턴-오프 시간은 급격히 감소한다. 이는 국부적인 수명조절의 경우 균일한 수명조절에 비해서 캐리어가 빠져나가는 속도가 빠르며 온-상태와 턴-오프 초기에는 전도도 변조로 인해서 전자와 정공의 농도가 거의 비슷하지만, 시간이 지날수록 다수 캐리어인 전자는 에피의 농도로 수렴하고, 소수 캐리어인 정공은 계속해서 감소하기 때문이다. 특히 국부적인 수명조절을 한 PT-IGBT의 경우 버퍼층 때문에 에피영역으로의 주입효율이 감소하는데다가 국부적인 수명조절 효과까지 있어서, 수명조절 영역에서 정공의 농도가 감소하는 비율이 증가해서 NPT-IGBT에 비해 에피영역의 전자와 정공의 농도가 낮은 것을 알 수 있다.

그림 5에  $\tau_L$ 의 변화에 따른 순방향 전압강하와 턴-오프 시간 사이의 trade-off 관계를 나타내고 에피영역 전체의 소수 캐리어 수명이  $5\mu s$ 로 균일한 경우와 비교하였다. 이로부터 국부적인 수명조절에서 수명조절 영역의 위치, 두께 및 조정수명을 최적화하면 균일한 수명조절에 비해서 순방향 전압강하의 증가를 최소화하면서 턴-오프 시간을 급격히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에 사용된 구조에서 100ns 정도의 짧은 턴-오프 시간과 3V 이하의 작은 순방향 전압강하를 목표로 할 때 NPT-IGBT의 경우  $\tau_L=0.8\mu s$ 를 PT-IGBT의 경우는  $\tau_L=0.4\mu s$ 를 택해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

IGBT의 스위칭 특성개선을 위하여 균일한 소수 캐리어 수명조절과 국부적인 소수 캐리어 수명조절을 이용하여 NPT-IGBT와 PT-IGBT의 최적화를 수행하였다.

NPT-IGBT에서 수명조절 영역의 위치, 두께, 소수 캐리어 수명을 변화시키면서 최적화를 수행한 결과, 수명조절 영역의 최적 위치는 에피영역과 애노드의 경계면이고, 최적 두께는  $20\mu m$ , 최적 소수 캐리어 수명은  $0.8\mu s$ 인 것으로 나타났다.  $5\mu s$ 의 균일한 소수 캐리어 수명을 갖는 경우와 비교하면 순방향 전압강하가 1.64V에서 2.87V로 증가하였지만 턴-오프 시간은 2050ns에서 120ns로 감소하였다. 한편 PT-IGBT에서는 수명조절 영역의 최적 위치는 버퍼영역이며 두께는 버퍼영역과 같이  $20\mu m$ 이고, 최적 소수 캐리어 수명은  $0.4\mu s$ 인 것으로 나타났다.  $5\mu s$ 의 균일한 소수 캐리어 수명을 갖는 경우에 비하면 순방향 전압강하가 1.37V에서 2.61V로 증가하지만 턴-오프 시간은 4490ns에서 110ns로 급격히 감소하였다. 이

로부터 국부적인 수명조절의 경우 버퍼영역의 캐리어 수명을 조절함으로써 순방향 전압강하와 턴-오프 시간이 목표치에 맞도록 최적화될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 앞으로 이에 대한 실험적인 검증이 필요할 것이다. 균일한 소수 캐리어 수명조절의 경우 보고된 실험결과와 비교하여 전자조사량과 조정수명간의 관계를 밝혔으며 그 결과는 전자조사에 의한 균일한 수명조절에 큰 도움이 될 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 국책연구개발사업 연구비지원에 의하여 수행되었음.(과제번호:97-N5-01-01-A-03)

#### 참 고 문 헌

- [1] B. J. Baliga, Power Semiconductor Devices, PWS, 1996
- [2] B. J. Baliga, "Comparison of Gold, Platinum and Electron Irradiation for Controlling Lifetime in Power Rectifiers", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-24, No. 6, pp. 685, 1977
- [3] W. A. Strifler and B. J. Baliga, "Comparison of Neutron and Electron Irradiation for Controlling IGT Switching Speed", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-32, No. 9, pp. 1629, 1985
- [4] M. Saggio *et al.*, "Innovative Localized Lifetime Control in High-Speed IGBT's", *IEEE Electron Device Letter*, Vol. 18, No. 7, pp. 333, 1997
- [5] J. Vobecky *et al.*, "Future Trends in Local Lifetime Control", *Proc. ISPSD '96*, pp. 161, 1996
- [6] Ettore *et al.*, "Analysis of Local Lifetime and Emitter Efficiency Control for the Design of Power Pin Diodes", *ISPS'98*, pp. 71, 1998
- [7] O. Elmazria *et al.*, "Simulation of Electrons Irradiation Damages to Optimize the Performance of IGBT", *IEEE Trans. Nuclear Science*, Vol. 44, No. 1, pp. 14, 1997

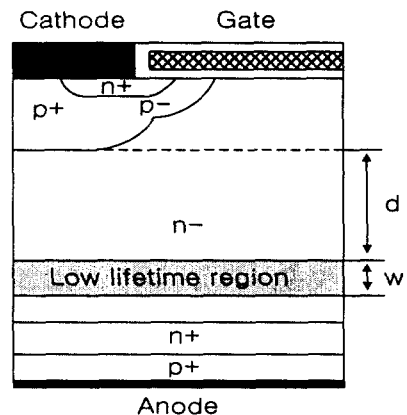
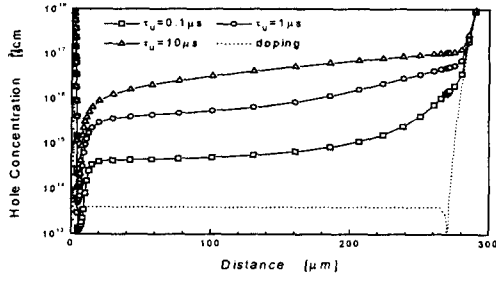
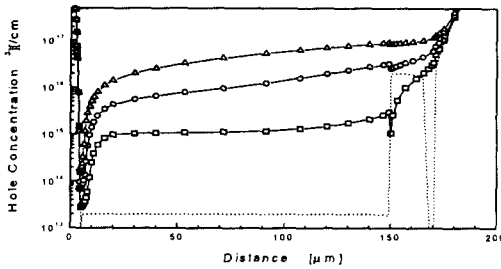


그림 1 PT-IGBT의 단면도  
Fig. 1 Cross-section of PT-IGBT



(a)



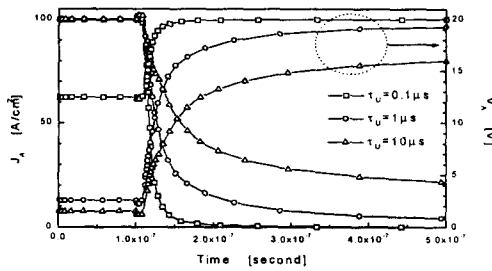
(b)

그림 2 소수 캐리어 수명에 따른 소수 캐리어 농도변화

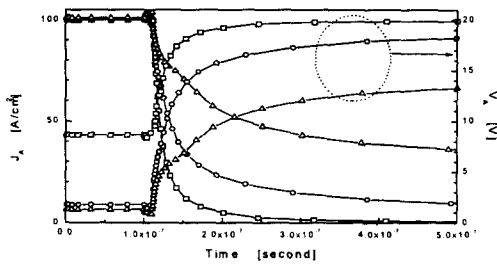
(a) NPT 구조 (b) PT 구조

Fig. 2 Minority carrier concentration as a function of the lifetime

(a) NPT structure (b) PT structure



(a)



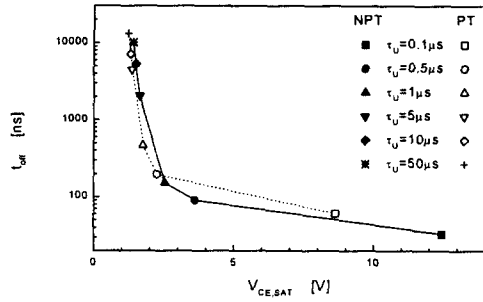
(b)

그림 3 소수 캐리어 수명에 따른 애노드 전류와 전압의 턴-오프 파형

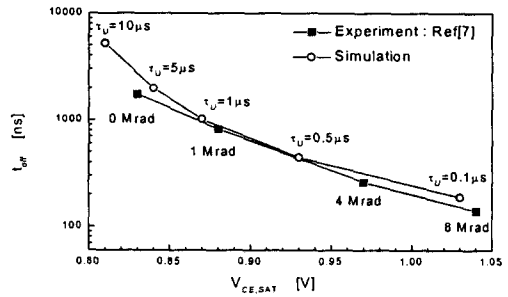
(a) NPT 구조 (b) PT 구조

Fig. 3 Turn-off anode current and voltage as a function of the lifetime

(a) NPT structure (b) PT structure



(a)



(b)

그림 4 소수 캐리어 수명에 따른 Trade-off 관계

(a) 시뮬레이션 (b) 실험결과와 시뮬레이션 비교

Fig. 4 Trade-off relation as a function of the lifetime

(a) Simulation

(b) Simulation results compared with experimental results

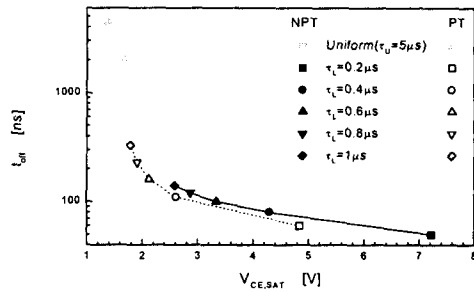


그림 5 순방향 전압강하와 턴-오프 시간의 Trade-off 관계

Fig. 5 Trade-off relationship between  $V_{CE,SAT}$  and  $t_{off}$