

온도 변화에 따른 NPT-IGBT의 과도 특성

Transient Characteristics of NPT-IGBT with different temperatures

류세환*, 황광철*, 안형근*, 한득영*

(Se-Hwan Ryu*, Kwang-Chul Hwang*, Hyung-Keun Ahn*, Deuk-Young Han*)

Abstract

In this work, transient characteristics of NPT(Non Punch Through)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) have been studied with different temperatures analytically. Power losses are caused by heat generated in NPT-IGBT for steady state and transient state conditions. We therefore have focused on the analysis of excess carrier concentration and excess charge injected into N-drift layer with different temperatures and have obtained anode voltage drop during turn-off with lifetime of 2.4[μ s].

Key Words : NPT(Non-Punch Through), IGBT, N-drift layer, excess carrier, lifetime

1. 서론

최근 전력용 반도체 소자로 각광을 받고 있는 IGBT 소자의 과도 상태 시 발생하는 손실에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고[1][2][3], 특히 온도 특성에 관한 연구에 관해서 많은 관심이 모아지고 있다[4][5]. 특히 turn-off 시 발생하는 전력 손실이 turn-on 시 발생하는 전력손실보다 많기 때문에 turn-off 시의 IGBT 모델에 대해 연구가 많이 이루어지고 있고, 본 연구의 선행 연구에서도 수명시간에 따른 과도 특성을 제시한 바 있다.[6] NPT-IGBT 소자는 동작 시 많은 열을 방출함으로써 스위칭 시 많은 전력 손실을 발생하고 있고, 외부 기기에 영향을 미치고 있다. 이로 인해 heatsink와 같은 열을 방출하고 억제시키는 방법에 관해서도 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 물성적인 해석 방법을 이용해서 온도에 관한 NPT-IGBT의 과도 특성 해석 모델을 연구하였다. NPT-IGBT의 BJT 부분의 베이스 영역으로 들어가는 과잉 소수 캐리어와 베이스 영역에 축적

되는 전하량과 과도 전압 변화를 온도 변화에 따라 그 특성을 제시하였다.

온도가 증가함에 따라 베이스 영역으로 주입되는 과잉 소수 캐리어의 양이 많아지고 그로 인해 축적되는 전하량의 양도 증가하였다. 축적된 전하는 turn-off 시 스위칭 시간을 증가시키는 요인인 tail 전류를 발생시킴으로써 전력 손실을 증가시킨다. 실제 온도가 증가함에 따라 스위칭 시 소자에 걸리는 애노드 전압의 증가 시간이 늦어지는 것을 알 수 있었다.

2. 본론

2.1 IGBT model

본 연구에 사용된 NPT-IGBT는 그림 1에서 보여주고 있다. 대전력용으로 고안된 이 소자는 스위칭 속도는 높지 않으나 큰 전력에서 사용할 수 있는 장점이 있다. NPT-IGBT 모델은 주 전류 메카니즘이 일어나는 BJT 부분을 해석함으로써 정상상태와 과도 상태 시 발생하는 과잉 소수 캐리어의 분포와 N-drift 영역에 축적되는 전하와 그 분포를 나타냈고, 그것을 통해 스위칭 시 과도 애노드 전압 강하를 구하였다.

그림 2는 본 논문에서 제시하는 NPT-IGBT의

* 건국대학교 전기공학과
(서울시 광진구 화양동 1번지)
Fax: 02-447-9186
E-mail : ryu382@kkucc.konkuk.ac.kr

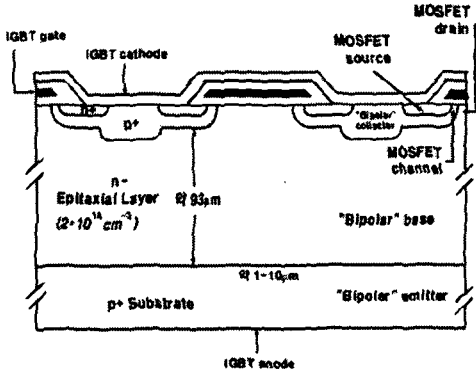


그림 1. NPT-IGBT의 구조

Fig. 1. Structure of NPT-IGBT

BJT 부분의 1차원적인 좌표시스템을 나타내고 있다.

N-drift 영역으로 주입되는 과잉 소수 캐리어는 소수 캐리어 확산 방정식을 이용해서 구하면 된다. 소수 캐리어 확산 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} = \frac{\delta p}{L(T)^2} + \frac{1}{D(T)} \frac{\partial \delta p}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 L 은 확산길이를 나타내고 있고, D 는 ambipolar 확산계수를 나타낸다.

식(1)를 풀게 되면 식(2)와 같이 N-drift 영역으로 주입되는 과잉 소수 캐리어의 함수를 구할 수 있다.

$$\delta p_s(x) = P_0(T) \frac{\sinh[(W(T)-x)/L(T)]}{\sinh(W/L(T))} \quad (2)$$

여기서 P_0 는 $x=0$ 에서의 초기 과잉 소수 캐리어 농도를 나타내고, 식 (3)에서 보여주듯이 온도에 따라 변화하는 함수이다. δp_s 는 정상 상태 시 N-drift 영역에서 변화하는 과잉 캐리어의 분포를 나타낸다.

$$P_0(T) = \frac{L J_T}{2 q D_p} \tanh \frac{W}{L} \quad (3)$$

여기서 W 는 실제 캐리어가 이동하는 영역으로 전체 drift 영역에서 베이스-컬렉터 접합에 의해 형성되는 공핍층을 제외시킨 영역이고, D_p 는 정공

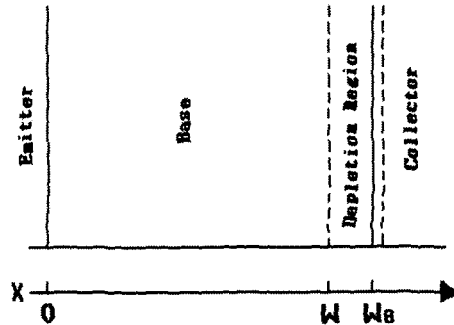


그림 2. BJT부분의 1차원적 좌표시스템

Fig. 1. One dimensional coordinate system of BJT portion

의 확산계수를 나타낸다.

$$W = W_B - W_{bcj} \quad (4)$$

여기서 W_B 는 전체 N-drift 영역을 나타내고, W_{bcj} 는 IGBT의 BJT 부분의 베이스-컬렉터 공핍층을 나타낸다.

식(5)는 과도 상태 시 N-drift 영역에 주입되는 과잉 캐리어 농도의 식을 나타내고 있다.

$$\delta p_i(x, T) = P_0 \left(1 - \frac{x}{W}\right) - \frac{P_0}{2Dt} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{Wx}{6} - \frac{x^3}{3W}\right) \quad (5)$$

식 (6)은 과도 상태 시 N-drift 영역에 축적된 전하량의 해석적인 모델이다. δp_i 는 과도 상태 시 N-drift에 제거되는 과잉 소수 캐리어 분포를 나타낸 식으로 시간과 공간의 식으로 주어진다. 이번 시뮬레이션에서는 해석적인 방법을 적용하기 위해 시간을 고정시키고 거리와 온도를 변수로 놓고 분포를 구하였다.

식(6) 과도 상태 시 N-drift 영역에 축적된 전하량의 분포를 나타낸 식으로 시간과 온도에 따라 그 추이를 시뮬레이션 하였다.

$$Q_i(t, T) = [q P_0 A L \tanh(W/2L)] e^{-t/\tau_m} \quad (6)$$

여기서 A 는 소자의 단면적을 나타내고, τ_{HL} 는 소수 캐리어 수명시간을 나타낸다.

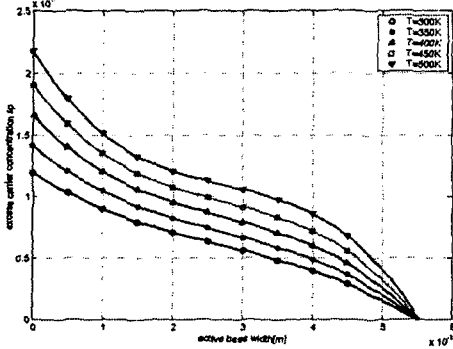


그림 3. 온도 변화에 따른 과잉 캐리어 농도의 분포
Fig 3. Distribution of Excess carrier concentration with different temperatures

2.2 온도에 따른 변수들

NPT-IGBT는 내부의 높은 온도로 인하여 진성 캐리어 농도, 유효질량, 이동도 등이 변하게 된다. 이를 식으로 표현하면 [7][8]

$$n_i = 4 \times 10^{15} \times \left(\frac{m_n^*}{m_0} \cdot \frac{m_p^*}{m_0} \right)^{3/4} \times \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (7)$$

$$\frac{m_n^*}{m_0} = 1.028 + (6.11 \times 10^{-4})T - (3.09 \times 10^{-7})T^2 \quad (8)$$

$$\frac{m_p^*}{m_0} = 0.610 + (7.83 \times 10^{-4})T - (4.46 \times 10^{-7})T^2 \quad (9)$$

이때 여기서 n_i 는 진성 캐리어 농도, m_n, m_p 는 각각 전자, 홀의 유효 질량을 나타낸다. 또한 전자와 정공의 이동도는 각각 다음과 같다.

$$\mu_n(T) = \mu_{n300} \left(\frac{T}{300} \right)^\beta \quad (10-a)$$

$$\mu_p(T) = \mu_{p300} \left(\frac{T}{300} \right)^\beta \quad (10-b)$$

식(10)은 온도에 따른 이동도의 식을 간단하게 표현한 것으로 μ_n, μ_p 는 전자와 홀의 이동도를 나타내는 것이고 β 는 온도지수를 나타낸다.

$$D_n(T) = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_n(T) \quad (11-a)$$

$$D_p(T) = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_p(T) \quad (11-b)$$

이동도와 확산계수는 서로 연관성을 가지고 있으므로 D_n 과 D_p 또한 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

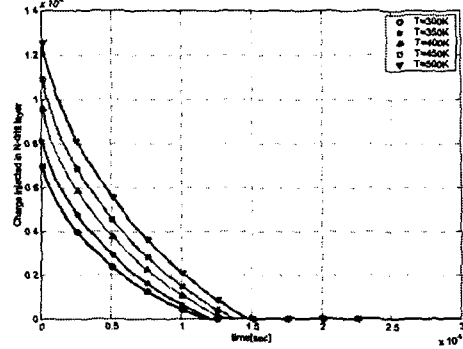


그림 4. 수명시간이 2.45[μs]일 때의 온도 변화에 따른 N-drift에 축적된 전하량의 분포

Fig. 4. Distribution of Charge in N-drift with different temperatures when lifetime is 2.4 [μs]

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 온도 변화에 따른 과잉 소수 캐리어 분포와 N-drift 영역에 축적되는 전하량의 분포와 이를 토대로 애노드 전압 강하의 변화를 나타내었다. 300[K]일 때의 수명시간은 2.45[μs]로 놓고 가상실험을 하였다.

그림 3은 300K부터 500K까지 50K씩 변화시킬 때의 과잉 소수 캐리어 분포를 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 캐리어가 증가했음을 보여주고 있다. 이러한 원인으로 인해 N-drift 층에 주입되는 전하가 증가하고, 축적되는 전하량 또한 증가하게 될 것이다.

그림 4는 turn-off 시 스위칭 손실에 영향을 주는 N-drift 영역에 축적되는 전하량을 300K부터 500K까지 50K씩 변화시켜 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 축적된 전하량이 많아지는 것을 알 수가 있다. 이로 인해 turn-off 시 애노드 전압의 변화에 영향을 미친다.

그림 5은 온도가 300[K], 400[K], 500[K]일 때의 애노드 전압 강하를 보여주고 있다. 300[K]일 때는 참조 데이터와 거의 일치함을 보여주고 있고, 온도가 증가함에 따라 상온일 때 보다 애노드 전압 강하의 기울기가 작아지는 것을 알 수가 있다. 온도가 증가함에 따라 전하량의 증가와 내부 농도의 증가로 수명시간도 변화하게 된다. 그러한 영향 때문에 turn-off 시간이 길어지게 되고 이는 스위칭 시 회로적으로 전력 손실을 일으키게 되는 주 원인으로 작용하게 된다.

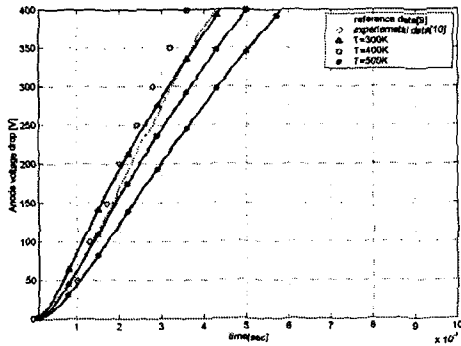


그림 5. 온도 변화에 따른 애노드 전압강하
 Fig. 5. Anode voltage drop with different temperatures

4. 결론

본 연구에서는 NPT-IGBT의 온도 변화에 따른 과도 특성에 대한 모델을 해석적으로 제시하였다. 본 연구를 통해 N-drift 영역에서의 온도에 따른 과잉 소수 캐리어와 축적되는 전하량을 해석하고, 이를 통해 과도 전압 특성을 분석하였다. 온도가 증가함에 따라 주입되는 캐리어의 양이 많아지고 이로 인해 축적되는 전하가 많아지게 된다. 이것은 결국 스위칭 속도를 저하시키고 전압이 서서히 증가함으로써 전력손실을 발생하게 된다. 차후 전류 모델을 추가함으로써 스위칭 시 발생하는 전력 손실을 모델링하고, 온도에 관한 모델을 해석적으로 제시하고자 한다.

참고 문헌

[1] Allen R. Hefner, David L. Blackburn, "An Analytical Model for the Steady-State and Transient Characteristics of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor," *Solid-State Electronics*, Vol. 31, No. 10, pp. 1513-1532, 1988.
 [2] K. Sheng, F. Udrea, G.A.J. Amaratunga, "Optimum carrier distribution of the IGBT", *Solid-State Electronics*, Vol. 44, pp. 1574-1583, 2000.
 [3] Malay Trivedi, Krishna Shenai, "Internal Dynamics of IGBT Under Zero-Voltage and

Zero-Current Switching Conditions", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, No. 6, Jun. 1999.

[4] O. Apeldoorn, S. Schmitt and R.W. De Doncker, "An Electrical Model of a NPT-IGBT Including Transient Temperature Effects Realized with PSpice Device Equation Modeling", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 45, No. 1, Jan. 1998.
 [5] Anis Ammous, Bruno Allard and Herve Morel, "Transient Temperature Measurements and Modeling of IGBT's Under Short Circuit", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 5, No. 4, Oct. 1990.
 [6] Sehwan Ryu, HyungKeun Ahn, DeukYoung Han, "An Analytical Transient Model for NPT IGBT", *ICPE '01 International conference on power electronics*, pp 26-30, Oct. 2001.
 [7] Donald A. Neaman, *Semiconductor Physics and Devices*, IRWIN, pp 176-181, 1997.
 [8] Robert F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 75-148, 1996.
 [9] Allen R. Hefner, David L. Blackburn, "An Analytical Model for the Steady-State and Transient Characteristics of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor," *Solid-State Electronics*, Vol. 31, No. 10, pp. 1513-1532, 1988.
 [10] Allen R. Hefner, "An Improved Understanding for the Transient Operation of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 5, No. 4, Oct. 1990.