

과도 상태 시 NPT IGBT의 전압-전류 모델링

류세환, 이명수*, 안형근, 한득영

건국대 전기공학과, 기술표준원*

Voltage-Current Modeling of NPT IGBT for Transient Condition

Se-Hwan Ryu, Myung-Soo Lee*, Hyung-Geun Ahn, and Deuk-Young Han

Konkuk University, ATS*

Abstract

In this work, Analytical model for voltage and current characteristics of NPT(Non-PunchThrough) IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) was represented. voltage and current characteristics models were based on prediction on power loss of NPT IGBT during transient condition. For Analytical current model, excess carrier concentration and accumulated charge in active base width was analyzed with time variance. Analytical models were simulated by varying lifetime of excess minority carrier.

Key Words : transient, excess carrier, NPT IGBT, Modeling, lifetime

1. 서론

현재 인버터, 컨버터, UPS 등에 많이 이용되고 있는 IGBT는 BJT와 MOSFET의 장점을 적용하여 입력 임피던스와 간단한 구동 드라이브를 구현하고, 대전류와 높은 항복 전압을 가지는 특징이 있다[1]. 하지만 대전류·대전압용으로 사용하기 위해 BJT 부분의 베이스 부분의 농도를 낮게 하고, 그 폭을 크게 하여 스위칭 속도의 한계를 나타내고 있다. 또한 넓은 베이스 영역에 축적되는 전하량에 의해 tail 전류가 발생하게 되고 이러한 현상에 의해 많은 전력 손실이 발생하고 있다. 이러한 전력 손실은 IGBT 소자 내부에서의 열 발생으로 전이되어 소자의 특성을 약화시키고 외부 시스템에도 영향을 미치는 요소로 작용하고 있다. 이러한 문제점이 최근 많이 대두되고 있고, 연구도 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 IGBT의 열적 특성을 해석하기 위해서 먼저 선행

되어야 하는 과도 상태 시 전력 손실을 예측하기 위해서 전압 전류 모델을 제시하고자 한다. 또한 기존의 복잡한 계산 과정이 필요한 모델들[2][3]과는 달리 해석적 모델들을 제시함으로써 IGBT의 많은 파라미터들을 바로 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 우리가 제시하는 모델링은 시뮬레이터를 통해서만 그 결과를 나타내었지만, 내부 파라미터는 현재 사용되고 있는 상용 IGBT 소자의 파라미터를 이용하였다. 또한 전압-전류 특성에 중요한 영향을 미치는 파라미터인 베이스 영역에서의 과잉 소수 캐리어의 수명 시간에 변화에 따라 특성을 해석하였다. 과도 상태 시 전류 모델링을 구현하기 위해 과도 상태 시 소수 캐리어 분포와 베이스 영역에 축적된 전하량 분포를 나타내었다. 본 연구를 기반으로 PT(PunchThrough) IGBT에 대한 특성 해석도 가능하리라 사료되고, 특히 과도 상태 시 전력 손실에 대한 연구와 그에 따른 IGBT의 열적 특성 해석에도 도움이 되리라 사료된다.

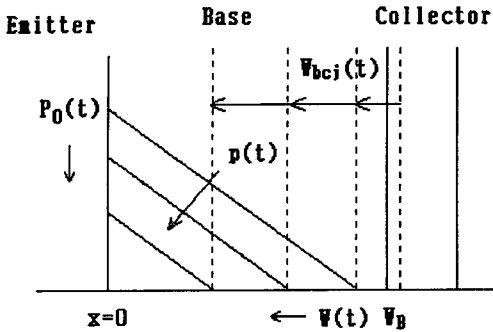


그림 1. 과도 상태 시 베이스 폭, 과잉 소수 캐리어 분포

Fig 1. Base width and excess minority carrier distribution for transient condition

표 1. IGBT의 물성 파라미터

Table 1. Physics parameters of IGBT

파라미터	값
베이스 폭(W_B)	175[μm]
베이스 농도(N_B)	$7 \times 10^{13}[\text{cm}^3]$
유효면적(A)	0.1[cm^2]
전자1개의 전하량(e)	$1.9 \times 10^{-19}[\text{C}]$
엠틀라 확산계수(D)	17.80[cm^2/sec]
이미터 포화전류(I_{sne})	$7 \times 10^{-14}[\text{A}]$

2. 본 론

2.1 과도 상태의 IGBT 모델

과도 상태 시 IGBT의 모델은 정상 상태 모델을 초기값으로 설정하고 구할 수 있다. 과도 상태 해석을 위해서 그림1에서 보여주는 것과 같이 먼저 정의해야 하는 부분은 IGBT의 BJT 부분의 영역에서 시간에 따른 베이스-컬렉터 접합의 변화와 거기에 따른 베이스 영역의 폭을 정의하면 다음과 같이 나타낸다[4].

$$W(t) = W_B - W_{bcj}(t) \quad (1)$$

$$W_{bcj}(t) = \sqrt{\frac{2e_{si} V_A(t)}{eN_B}} \quad (2)$$

식(1)의 변화에 따라 베이스 영역에서 정상 상태

동안 축적된 과잉 캐리어 농도가 변화하게 된다. 과잉 캐리어 농도의 변화를 통해 축적 전하량의 과도 특성을 해석할 수 있고, 전류식을 유도할 수 있다. 먼저 시간과 공간에 따라 변화하는 과잉 소수 캐리어의 농도 분포는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$p(x, t) = P_0(t) \frac{\sinh[(W(t)-x)/L]}{\sinh(W(t)/L)} \quad (3)$$

기존의 논문에서는 초기 캐리어 농도 P_0 의 값을 고정시키고 값을 유도했으나 실제 물성적인 현상을 고려하면 P_0 의 값도 시간에 따라 변화하는 것으로 해야 한다. 이러한 것을 적용하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

과잉 캐리어 농도의 감소에 따른 베이스 영역의 축적 전하량의 변화는 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_T(t) = Q_0(t)(1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (4)$$

$$Q_0(t) = [eP_0(t)AL \tanh(W(t)/2L)] \quad (5)$$

$Q_0(t)$ 은 초기 축적 전하량이고, L은 확산 길이를 나타낸다. 과도 상태 시 전류식은 축적 전하를 이용해서 구하면

$$\frac{dI_T(t)}{dt} = -\frac{I_T(t)}{\tau_{HL}} - \frac{I_T^2(t)I_{sne}}{D_p n_i^2 q^2 A^2} \quad (6)$$

식(6)과 같이 미분방정식을 세울 수 있고, 이것을 풀게 되면 턴-오프할 때의 전류식을 구할 수 있다.

$$I_T(t) = \frac{I_{T0}}{\left\{ \left[1 + \frac{I_{T0}}{I_r} \right] e^{\frac{t}{\tau_{HL}}} - \frac{I_{T0}}{I_r} \right\}} \quad (7)$$

$$I_r = \frac{e^2 A^2 D_p n_i^2}{I_{sne} \tau_{HL}} \quad (8)$$

I_{T0} 는 정상 상태 시 흐르는 전류이고, I_r 은 상수 부분을 치환해서 정의한 것이다. 위의 식은 전력 손실에 영향을 미치는 턴 오프에서의 전류식은 나타낸다. 식(8)에서 D_p 는 정공의 확산계수, n_i 는 진성 캐리어 농도, τ_{HL} 은 과잉 소수 캐리어 수명 시간을 나타낸다[6].

전류식은 식(7)과 같이 나타낼 수 있고, 턴 오프 시 전압 파형은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다. 전압식은 베이스-컬렉터 영역의 공핍층에 의한 요인

으로 형성되는 커패시터 특성에 의해 유도한다.

$$V_A(t) = \frac{R_B^2 - 2tR_A R_C - R_B \cdot \sqrt{R_B^2 - 4tR_A R_C}}{2R_A^2} \quad (9)$$

여기서

$$R_A = R(R \cdot t \cdot I_T(t) + R_r \cdot Q_T(t))$$

$$R_B = W_B(2R \cdot t \cdot I_T(t) + R_r \cdot Q_T(t))$$

$$R_C = W_B^2 \cdot I_T(t) - 4D_p \cdot Q_T(t)$$

$$R_r = (A\epsilon_{ss}(1+1/b))/(3eAN_B R)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서 제시한 모델의 결과를 알아보기 위해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 과도 특성을 결정하는 중요한 파라미터인 수명 시간을 변화시켜 그 결과를 살펴보았다.

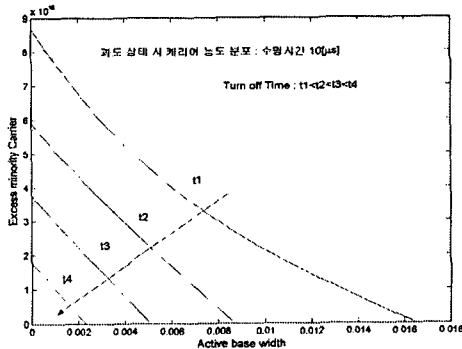


그림 2. 과도 상태 시 과잉 소수 캐리어 분포

Fig 2. excess minority carrier distribution for transient condition

그림 2는 과잉 소수 캐리어 농도의 분포를 나타낸 것이다. 수명 시간은 10[μs]로 주어졌고, t1에서 t4까지 턴오프 시간이 증가할 때 과잉 소수 캐리어가 변화하는 것을 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 수명 시간에 변화에 따른 과도 상태 시 축적 전하량 변화를 나타낸 것이다. 수명 시간은 4[μs], 6[μs], 8[μs], 10[μs]로 주어졌고, 수명 시간에 클수록 많은 양의 전하량이 축적되어 있는 것을 알 수가 있다. 하지만 수명 시간이 6, 8, 10[μs]의 경우 축적되는 전하량의 차이가 점점 줄어드는 것을 보여주고 있다.

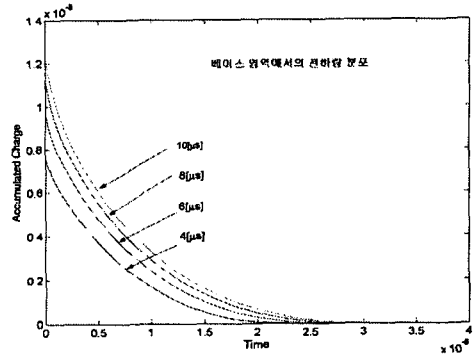


그림 3. 수명 시간에 따른 과도 상태 시 축적 전하량 캐리어 분포

Fig 3. Accumulated charge distribution with lifetimes for transient condition

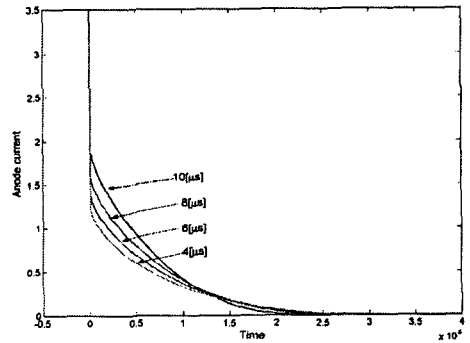


그림 4. 수명 시간에 따른 과도 상태 시 애노드 전류 분포

Fig 4. Anode current with lifetimes distribution for transient condition

그림 4은 턴 오프 시 수명 시간에 따른 애노드 전류 모델을 시뮬레이션 한 결과이다. 턴오프가 완전히 되는 시간은 약 2.5[μs]에서 나타나고 있다. 수명 시간에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 수명 시간이 클 경우 전하량에서도 나타났지만 전류의 턴 오프 시간에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

그림 5은 IGBT 소자에 걸리는 애노드 전압 강하 모델을 시뮬레이션 한 결과이다. 전류와 마찬가지로 수명 시간에 따라 나타내었고, 애노드 전압은 400[V]를 인가한 것으로, 그리고 회로 구성은 저항

부하만 있는 것으로 가정하였다.

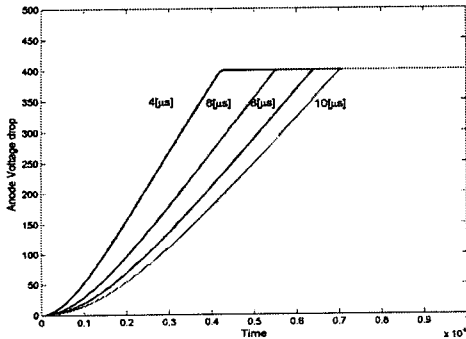


그림 5. 수명 시간에 따른 과도 상태 시 애노드 전압 강하 분포

Fig 5. Anode voltage drop with lifetimes distribution for transient condition

4. 결론

본 논문에서는 NPT IGBT의 과도 상태 시 전압-전류 모델을 해석적으로 제시하였다. 실제 실험 결과치와 비교를 하지 못해 정확하게 검증하지는 못했지만 일단 기본적인 물성을 기반으로 해석적으로 구현한 모델이기 때문에 파라미터의 변화에 쉽게 적용할 수 있는 모델이라 사료된다. 전류 모델은 수명 시간 변화 시 거의 차이를 나타내지 않았고, 전압 모델은 수명 시간이 커질수록 턴오프 시간이 커짐을 알 수 있었다. 비록 실험 결과와 비교하지는 못했지만 경향을 타당하게 나타났다고 고려할 수 있다. 차후 실험 결과와 비교하여 모델을 검증한다면 전력 손실 부분과 열 특성 해석에도 기초되는 연구가 되리라 생각된다.

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] Malay Trivedi and Krishna Shenai, "Investigation of the Short-Circuit Performance of an IGBT", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 45, No. 1, Jan. 1998.
- [3] Se-Hwan Ryu/Hyung-Keun Ahn/Deuk-Yong Han, "An analytical Transient Model for NPT IGBT", *ICPE'01*, pp 26-30, 10, October, 2001
- [4] Allen R. Hefner, "Analytical Modeling of Device-Circuit Interactions for the Power Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 26, No. 6, Nov./Dec. 1990.
- [5] Robert F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 75-148, 1996.
- [6] 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.