

수명시간에 따른 NPT-IGBT의 N-drift 영역에서의 과잉소수 캐리어와 전하량 분석

Analysis of excess minority carrier and charge with lifetimes in N-drift region of NPT-IGBT

류세환, 이용국, 안형근, 한득영

(Sehwan Ryu, Yongkuk Lee, Hyoungkeun Ahn, Deukyoung Han)

Abstract

In this work, transient characteristics of the Non-Punch Through(NPT) Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT) has been studied. we has analyzed with lifetimes excess minority carrier injected into N-drift, base region of IGBT's BJT part and accumulated charge of on-state which affected swiching characteristic. In this paper, excess minority carrier and charge distribution in active base region is expressed analytically. This analysis proposed optical trade-off between lifetimes and accumulated charge for decreasing switching losses because charge result in switching loss when device was turned off.

Key Words : Non-Punch Through Insulated Gate Bipolar Transistor(NPT IGBT), lifetime, N-drift, excess minority carrier, accumulated charge

1. 서론

최근 MOSFET의 간단한 구동회로와 BJT의 온 상태 시 낮은 저항을 가지는[1] IGBT의 과도상태 시 발생하는 손실에 대한 연구가 활발히 진행되어 지고 있다. IGBT의 과도상태 중 턴 온 시에 발생하는 손실은 그리 크지 않으나 턴 오프 시 발생하는 전력 손실은 크다. 이것의 원인은 여러 가지가 있겠지만, 과잉 소수 캐리어에 의해 IGBT의 BJT 부분의 base 부분인 N-drift 영역에 축적되는 전하량에 의해서도 발생하게 된다[2]. 이러한 전력손실을 줄이기 위해 외부 회로적인 측면[3,4]을 이용해 보상할 수도 있으나 본 연구에서는 소자 작동시 나타나는 과잉

소수 캐리어와 전하량의 해석으로 턴 오프 시 나타나는 전력 손실을 보상할 수 있다. 과잉 소수 캐리어는 턴 온 시 베이스 층에 주입되는 캐리어로 농도와 수명시간에 따라 변화하게 된다. 물론 캐리어의 양에 따라 축적되는 전하량의 양도 변화하게 되는데, 수명시간은 공정 파라미터로 소자의 제작 시 결정되는 파라미터이다.

본 연구에서는 수명시간에 따라 변화하는 과잉 소수 캐리어와 전하량의 분포를 나타내었고, 또한 과도 상태 시 변화하는 과잉 소수 캐리어의 분포를 애노드 전압의 변화에 따라 해석적으로 나타내었다. 과잉 소수 캐리어의 해석은 IGBT의 BJT의 베이스에 해당하는 N-drift 영역에 축적되는 전하량의 양을 구할 수 있고, 이것은 IGBT에 흐르는 전류와 턴 오프 시 소자에 걸리는 애노드 전압을 해석적으로 구할 수 있다. 수명시간과 과잉 소수 캐리어, 그리고 축적되는 전하량의 관계를 정확하게 분석함으로써

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

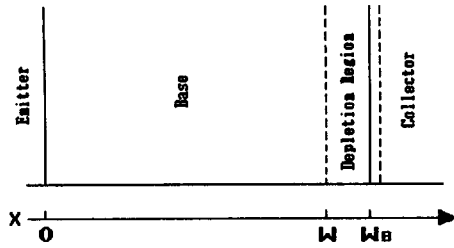


그림 1. 쌍극성 트랜지스터 모델을 전개하기 위해 쓰이는 좌표 시스템.

실제 공정 시 필요한 최적의 공정 파라미터를 제시하고자 한다.

그림 1에 나타나는 1차원적인 좌표 시스템을 통해 IGBT의 해석적인 모델을 제시하였다. 이 좌표 시스템을 이용해서 IGBT에 모델에 대한 식들을 유도하였다.

2. 본론

2.1 정상 상태의 IGBT 모델

NPT IGBT의 turn-off 특성을 해석하기 위해서 쌍극성 접합 트랜지스터(BJT)의 부분을 해석하였다. IGBT의 MOSFET 부분은 주로 on/off 제어에서만 관여하고, turn-off시 베이스 전류로서 나타나는 채널층을 통한 전자 전류는 급격하게 0으로 되기 때문에 BJT부분만을 고려해서 해석하였다. 해석 시 IGBT의 BJT부분은 고준위 주입으로 고려하고, ambipolar 전송[5]을 고려하였다.

턴은 시 주입되는 과잉 소수 캐리어 농도는 소수 캐리어 확산방정식을 이용해서 구하게 된다. 이것은 식 1에서 보여주고 있다[6].

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

여기서 δp 는 과잉 소수 캐리어이고, L 은 캐리어의 확산길이, D 는 앰비폴러 확산계수를 나타낸다. 확산길이 L 이 수명시간에 대한 함수로 주어지고 수명시간이 변화하면 주입되는 과잉 소수 캐리어가 변화하게 된다. 식 1을 풀게 되면 δp 를 구할 수 있는데 정상 상태 일때의 N-drift로 주입되는 과잉 소수 캐리어는 다음과 같다[7].

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

여기서 W 는

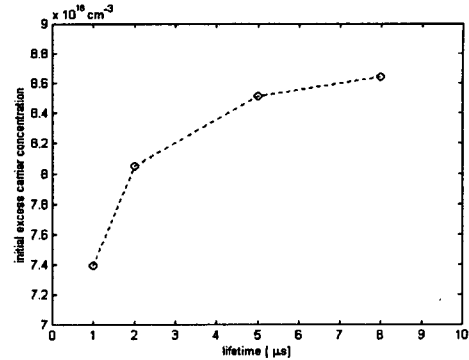


그림 2 수명시간에 따른 초기 과잉 소수 캐리어 농도

$$W = W_B - W_{bcj} \quad (3)$$

로 나타내고, 실제 베이스 영역을 나타낸다. W_B 는 전체 베이스 영역을 나타내고 W_{bcj} 는 컬렉터와 베이스온 시에서는 그리 큰 영향을 받지 않으나 턴오프 시에는 애노드 전압 강하에 의해 급격하게 변화하게 된다.

과잉 소수 캐리어에서 P_0 는 N-drift 영역과 BJT부분의 Emitter 부분과의 경계면에서 초기 과잉 소수 캐리어 값이다. 이 값은 식 4에서와 같이 나타내고 그림 2에서 수명시간에 따른 변화값을 나타내고 있다.

$$P_0 = \frac{L J_T}{2 q D_p} \tanh \frac{W}{L} \quad (4)$$

2.2 과도 상태의 IGBT 모델

과도 상태 시 BJT부분의 베이스와 컬렉터 영역의 공핍층은 급격하게 증가하게 한다. 공핍층은 소자에 걸리는 애노드 전압 강하에 의해 변화하게 되는데 식 5와 같이 나타낸다.

$$W_{bcj} \approx \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} V_A(t)}{q N_B}} \quad (5)$$

과도 상태일 때는 전압에 따른 공핍층이 변화함으로써 경계 조건이 변화하게 되는데 경계 조건이 변화하게 되면 과잉 소수 캐리어에 대한 식을 유도할 때 시간에 대한 항을 추가해야 되고, 전압 변화에 따라 주입된 과잉 소수 캐리어도 급격하게 감소하게 되는데, 과도 상태 시 과잉 소수 캐리어의 농도 식은 다음과 같다.

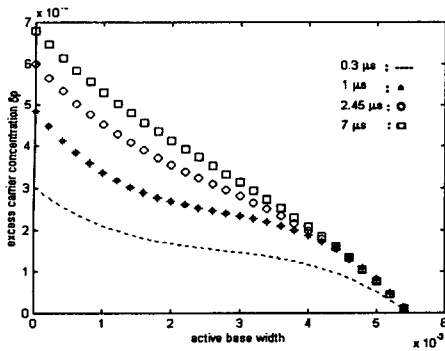


그림 3 수명시간 0.3[μs], 1[μs], 2.45[μs], 7.1[μs]에 따른 과잉 소수캐리어 분포

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

이 식은 과도 시간 대비 변화하는 소수 캐리어의 분포를 해석적으로 나타낸 식이다. 식 6의 첫 번째 항은 선형적으로 변화하는 항이고, 두 번째 항은 거리와 시간에 따라 변화하는 과잉 소수 캐리어 항을 나타내고 있다. 일단 수명시간 대비 과잉 소수 캐리어의 변화를 나타내었고, 그 다음에 시간에 따른 전압 변화에 따라 과잉 소수 캐리어의 분포를 나타내었다[8].

식 7은 과도 상태 시 N-drift 영역에 축적된 전하량을 해석적으로 나타낸 식으로 수명시간과 과도 시간에 대한 함수로 주어졌다.

$$Q_t(t) = [q P_0 A L \tanh(W/2L)] e^{-t/\tau_{HL}} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 주로 과잉 소수 캐리어와 베이스 층의 전하량을 다른 수명시간에 따라서 나타내었고, 애노드 전압도 캐리어 수명시간에 따라 그 변화를 나타내었다.

그림 2은 수명시간에 따른 초기캐리어농도를 나타내었는데, 수명시간이 클수록 초기캐리어 농도 P_0 가 커지는 것을 알 수가 있고, 수명시간이 커질수록 P_0 의 변화량이 작아지는 것을 보여주고 있다. 그림 3은 베이스 영역에서의 과잉소수캐리어의 분포를 전하 제어 성분과 그것을 공핍층의 변화에 영향을 받는 부분을 더한 것을 캐리어의 수명시간을 0.3[μs], 1[μs], 2.45[μs], 7.1[μs]로 변화시켜 나타내었다. 수명

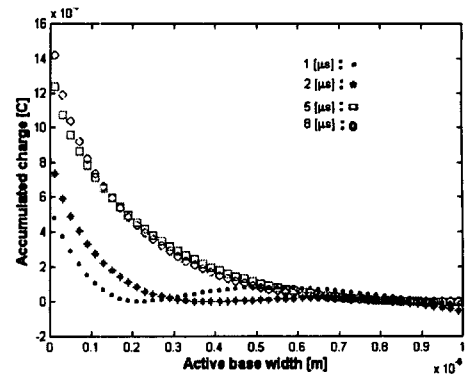


그림 4 수명시간 1[μs], 2[μs], 5[μs], 8[μs]에 따른 N-drift 영역에 축적된 전하량의 변화

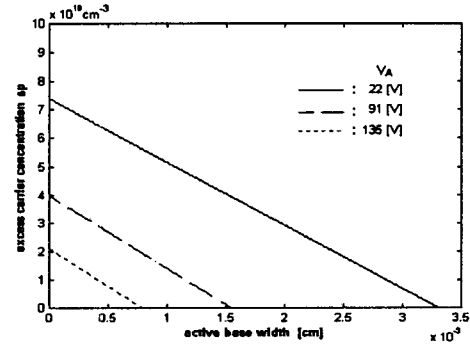


그림 5 애노드 전압 변화에 따른 베이스 영역에서의 과잉 소수 캐리어 분포

시간이 짧을수록 N-drift 영역으로 주입되는 캐리어의 양이 줄어드는 것을 볼 수가 있다. N-drift 영역으로 주입되는 캐리어는 턴오프 시 나타나는 전력손실에 영향을 주지만 턴온시 온 전압강하에 의한 손실에도 영향을 미친다. 그러므로 수명시간의 조절함으로써 턴온과 턴오프 손실에 대한 trade-off가 필요하다. 그림 4은 BJT 부분의 베이스 영역에 축적된 전하량을 수명시간 1[μs], 2[μs], 5[μs], 8[μs]에 따라 변화하는 분포를 나타내었다. 수명시간에 증가함에 따라 축적되는 전하량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 이것은 결국 수명시간이 증가할수록 제거해야할 전하량이 많아지는 것으로 턴오프 시간을 증가시킨다. 이것은 턴오프 전력손실의 주요 원인이라고 할 수 있다. 그림 5은 수명시간을 1[μs]일 때 애노드 전압 변화에 따른 N-drift 영역에서의 과잉 소수 캐리

어의 분포를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 NPT IGBT의 과도 상태 시 나타나는 특성을 해석적으로 분석하여 제시하였다. 수명 시간에 따른 과도 상태 시 변화하는 과잉 소수 캐리어의 분포를 해석적으로 분석함으로써 쌍극성 접합 트랜지스터 부분의 베이스에 저장된 전하량 Q에 대한 변화 추이를 해석하여 나타낼 수 있었다. 이 결과는 수명시간을 제어함으로써 베이스로 주입되는 전하량 Q를 조절할 수 있으므로 턴 오프 시 제거해야 하는 전하량 Q를 해석할 수 있다. 정상 상태 시 주입되는 과잉 소수 캐리어는 턴 오프 시 전력 손실의 주 원인으로 나타나지만 턴 온 시 나타나는 온 전압강하에도 영향을 미친다. 수명시간을 너무 작게 설정하여 만들게 되면 N-drift 영역으로 주입되는 과잉 소수 캐리어의 양이 적어지기 때문에 전도도 변조가 작게 일어나게 되고, 그것은 턴 온 시 전압강하를 증가시키게 된다. 그러므로 주입되는 과잉 소수 캐리어의 양을 수명시간을 제어함으로써 trade-off 해야 한다. 수명시간에 따른 과잉 소수 캐리어의 분포와 전하량의 변화는 추후 애노드 전압 강하를 해석할 때 이용할 것이다.

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] 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.
- [5] Donald A. Neaman, *Semiconductor Physics*

and Devices, IRWIN, pp 176-181, 1997.

- [6] Robert F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 75-148, 1996.
- [7] 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.
- [8] 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.