

IGBT의 컬렉터 구조에 따른 홀 주입효율의 변화

최 병 성, 정 상 구  
아주대학교 전자공학부

Variations of the hole injection efficiency with IGBT's collector structure

Byung-Sung Choi, Sang-Koo Chung  
School of Electronics Engineering, Ajou University

**Abstract** -The analysis of hole injection efficiency at the p+/n-drift layer junction in non-punchthrough IGBT structure is presented. This analysis takes into account carrier concentration variations by conductivity modulation. Good agreement between this analysis and simulation is found over a wide range of carrier lifetime and current density. The proposed analytical model of the hole injection efficiency as a function of collector width, collector concentration has been verified by device simulator, ATLAS.

1. 서 론

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 Power MOS의 구조와 비슷하며 동작원리는 바이폴라 트랜지스터에 가까운 소자로서 Power MOS의 전압구동방식을 갖고 순방향 전압강하가 상당히 낮은 소자이다. 주어진 항복전압에서 순방향의 전압강하를 최소화하는 것이 IGBT의 설계 시 가장 중요한 요소이며 이를 최적화하기 위한 여러 연구가 활발히 진행되어 왔다 [1-3]. 순방향 전압 강하를 해석하기 위하여 전자 및 홀 전류에 대한 해석이 이루어져야 하는데 이 때 중요한 변수가 컬렉터에서의 홀 전류 주입효율이다. 기존의 논문[1]은 바이폴라 트랜지스터에서 에미터의 주입효율을 해석하는 방법을 IGBT에 적용하였는데 이는 저 주입 상태의 이론을 그대로 적용한 것이다. 그러나, IGBT는 전도도 변화(conductivity modulation)에 의하여 순방향 동작 시 고 주입 상태가 되기 때문에 기존의 해석적인 식[1]을 그대로 적용하면 정확한 결과를 얻을 수 없다[4]. 컬렉터의 농도와 두께도 순방향 특성에 영향을 미치므로 홀 전류의 주입효율을 해석하는 데 고려되어야 한다.

본 논문에서는 컬렉터와 드리프트 영역의 경계면에서 고 주입 조건을 적용하여 캐리어 농도분포, 전류 밀도의 관계를 해석하고 홀 주입효율에 대한 보다 정확한 모델을 제안하였다. 해석 식에서 컬렉터는 균일하다고 가정 했으며 균일하게 도핑된 컬렉터 농도를 가진 3000V급은-핀치드루 IGBT의 구조를 가지고 시뮬레이션을 수행 하였다. 또한, 드리프트영역의 소수 캐리어 수명(minority carrier lifetime), 컬렉터의 두께, 컬렉터의 농도, 높게 도핑된 컬렉터에서의 band gap narrowing 등을 적용하여 얻은 해석적인 결과를 시뮬레이션과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석적 식의 유도

그림 1에서 접합 사이에서의 농도관계는

$$p^2(0) = n_C(0) N_C \exp(-\Delta V_g/kT) \quad (1)$$

$$n_C(x') = n_{C0} + (n_C(0) - n_{C0}) \times \frac{\sinh((W_C - x')/L_C)}{\sinh(W_C/L_C)} \quad (2)$$

여기서,  $p(0)$ 는 p+/n 접합에서 전도도 변화에 의한 드리프트 영역에서의 캐리어 농도이며,  $N_C$ 는 컬렉터 도핑농도,  $W_C$ 는 컬렉터 두께,  $L_C$ 는 컬렉터에서 전자의 확산거리이다.  $n_C(x')$ 는 컬렉터영역에서의 전자의 농도 분포를 나타낸다. 지수함수는 band gap narrowing에 의한 효과를 나타내며 이는  $N_C$ 에 의존하는 값이다. 전류방정식과 식 (1), (2)에서부터 접합부분에서의 전자 전류의 값을 구하면

$$J_n(0) = -qD_C \left. \frac{dn_C(x')}{dx'} \right|_{x=0} \approx J_{no} p_o^2 \quad (3)$$

가 된다. 여기서,

$$J_{no} = \frac{qnD_C}{L_C N_C [\tanh(W_C/L_C)]} \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서  $n = \exp(-\Delta V_g/kT)$ 이며 band gap narrowing에 의한 효과를 나타내는 지수이다. 접합부분에서의 전도도 변화에 의한 농도  $p_o$ 와 전류 방정식에 의해 홀 전류를 구하면

$$J_p(0) = \frac{J}{b+1} + \frac{qD_a p_o}{L_B \tanh(W_B/L_B)} \quad (5)$$

가 된다. 여기서,  $D_a$ 는 ambipolar 확산계수이며,  $W_B$ 는 드리프트 영역의 두께,  $b = \mu_n/\mu_p$ ,  $L_B$ 는 드리프트 영역에서의 ambipolar 확산거리이다. 위에서 식 (3)와 식(5)을 합하면 총 전류가 되며 이로부터 농도  $p_o$ 를 구하면

$$p_o = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{qD_a}{L_B J_{no} \tanh(W_B/L_B)} \right)^2 + \frac{4cI}{J_{no}}} - \frac{qD_a}{L_B J_{no} \tanh(W_B/L_B)} \right\} \quad (6)$$

가 된다. 식 (6)을 식 (5)에 적용하여 홀 전류의 주입 효율을 구하면 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{J_b(0)}{J} = \frac{1}{b+1} + \frac{qD_a(b_0/J)}{L_B \tanh(W_B/L_B)} \quad (7)$$

주입효율은 경계에서 캐리어의 농도와 전류 밀도의 함수로 나타내어진다. 위 식은 전류가 증가할수록 두 번째 항이 무시되어 주입효율이  $b = \mu_n/\mu_p$  (전자와 홀의 이동도 비율)에만 의존하게 된다는 것을 나타내고 있다.

## 2.2 Simulation 및 계산결과

그림 2는 농도와 두께가 각각 다른 두 콜렉터 구조에 대하여 드리프트 영역의 소수 캐리어 수명이 1μs일 때의 시뮬레이션 결과와 해석적인 결과를 나타내고 있다. 해석적인 식과 시뮬레이션이 잘 일치하여 콜렉터의 농도와 두께에 의한 영향을 잘 설명하고 있다. 즉, 콜렉터의 농도가 높고 두께가 두꺼울수록 주입 효율은 커지게 된다. 약간의 오차(10%이하)가 있는 이유는 콜렉터 쪽 경계부분에서 전자전류의 성분을 정확하게 측정하지 못하였기 때문이다.

그림 3은 그림 1에서 보는 바와 같이 p+n 접합에서 콜렉터 전압의 증가에 따라 전자 및 홀 전류밀도 성분과 주입효율이 변화하는 관계를 나타내고 있다. 전압이 증가함에 따라서 각 전류 성분은 증가하며 홀 전류의 주입효율은 감소하게 된다. 이는 전류가 증가함에 따라 에미터로부터의 전자의 주입이 홀 주입에 비해 커지기 때문이다. 이미 식 (7)에서 언급했듯이 전류밀도가 상당히 커지게 되면 두 번째 항이 거의 무시되므로 주입효율은  $b = \mu_n/\mu_p$  (전자와 홀의 이동도 비율)에만 의존하는 값이 되어 그림 2에서 보는 바와 같이 일정한 값으로 수렴하게 된다.

드리프트 영역의 소수 캐리어 수명은 IGBT의 순방향 특성을 결정하는 중요 변수로서 순방향 전압강하와 스위칭 속도의 trade-off 관계를 결정한다. 그림 4는 드리프트 영역의 소수 캐리어 수명에 따른 주입효율의 변화를 나타내고 있다. 소수 캐리어 수명 제어 기술로서 전자조사가 이용되고 있으며 최근에는 양성자조사를 이용한 방법도 알려져 있다. 부분적인 소수 캐리어 수명(local lifetime) 제어 기술도 있으나 이에 관한 효과는 고려되지 않았다.

그림 5는 콜렉터의 농도와 소수 캐리어 수명에 따른 주입효율의 변화를 보여주고 있다. 대부분의 경우 캐리어의 주입을 증가시켜 순방향 전압강하를 작게 하기 위해서 콜렉터의 농도를 높여 준다. 그러나, 한편으로는 스위칭 속도가 저하되는 문제도 있으므로 설계 시 원하는 trade-off 특성을 얻고자 한다면 콜렉터 농도를 고려하는 것이 바람직하다.

그림 6은 콜렉터의 두께  $W_C$ 와 소수 캐리어 수명에 따른 주입효율의 변화를 나타내고 있다. 콜렉터의 두께는 콜렉터에서의 소수 캐리어 확산거리와 관련이 있다. 두께가 소수 캐리어의 확산거리(농도가  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 인 경우 약  $L_C = 1.9 \mu\text{m}$ )보다 두꺼운 경우 ( $W_C \gg L_C$ )에는 주입효율의 변화는 거의 없지만 얇을 경우 ( $W_C \ll L_C$ )에는 콜렉터 전극으로부터 드리프트 영역으로 이동하는 캐리어의 이동거리가 짧아지므로 스위칭 속도가 향상되는 결과를 얻을 수 있다. 실제로 논-펀치드 루 구조에서 IGBT 콜렉터를 붕소-implant로 얇게 형성하여 스위칭 속도를 향상시키기도 한다(6).

## 3. 결 론

IGBT의 콜렉터 구조 변화에 따른 홀 주입효율의 해석적 모델을 제안하였고, 소수 캐리어의 수명, 콜렉터의 농도와 두께에 의한 영향을 시뮬레이션 결과와 비교하여 식의 타당성을 검증하였다. 순방향 동작 시 전도도 변조

효과에 의한 고 주입 조건을 고려하여 정확한 결과를 얻었으며, IGBT의 설계 시 적용하는 모든 변수로 나타내었다.

제안한 해석적인 식으로부터 IGBT의 순방향 동작특성에 대한 정보를 보다 정확하게 얻을 수 있어 최적설계 시 응용될 수 있으리라 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Di-Son Kuo, Chenming Hu, "An analytical model for the power bipolar-MOS transistor", Solid-St Electronics, Vol. 29, No. 12, pp. 1229-1237, 1986
- [2] Y. Yue, J. J. Liou, "An analytical insulated-gate bipolar transistor (IGBT) model for steady-state and transient applications under all free-carrier injection conditions", Solid-St Electronics, Vol. 39, No. 9, pp. 1277-1282, 1996
- [3] A. R. Hefner, Jr, D. L. Blackburn, "An analytical model for the steady-state and transient characteristics of the power insulated-gate bipolar transistor," Solid-St Electronics, Vol. 31, No. 10, pp. 1513-1532, 1988
- [4] R. A. Colclaser, "Microelectronics: Processing and Device Design", pp. 190-198, John Wiley, New York, 1980
- [5] S. K. Chung, "Injection Currents Analysis of p+/n-Buffer Junction", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 45, No. 8, p. 1850, 1998
- [6] F. Bauer, H. Dettmer, W. Fichtner, H. Lendenmann, "Design Considerations and Characteristics of Rugged Punchthrough IGBTs with 4.5kV Blocking Capability," Proc. ISPSD, pp. 327-330, 1996

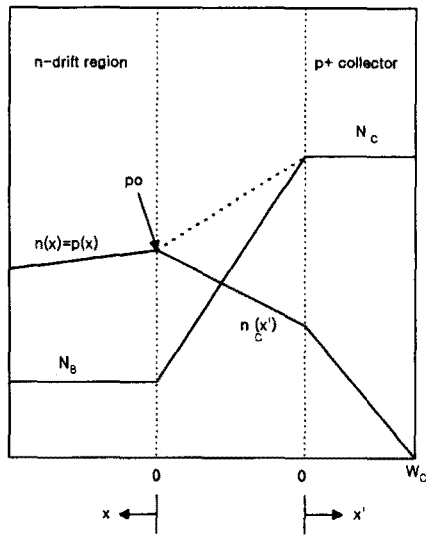


그림 1. simulation에 이용된 3000V급 IGBT의 p+/n 접합에서의 농도 분포.

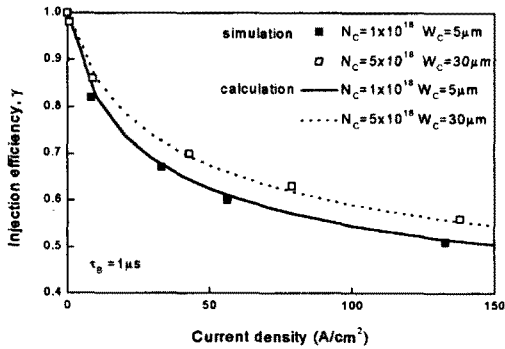


그림 2. 전류와 주입효율의 관계.

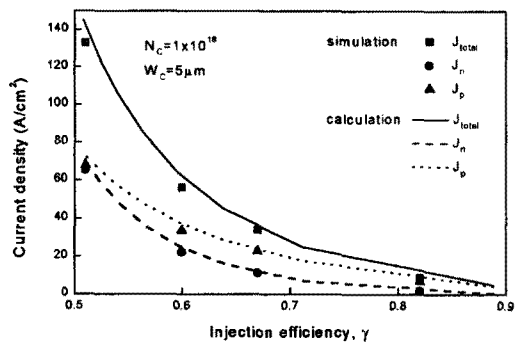


그림 3. 주입효율과 전류 성분과의 관계.

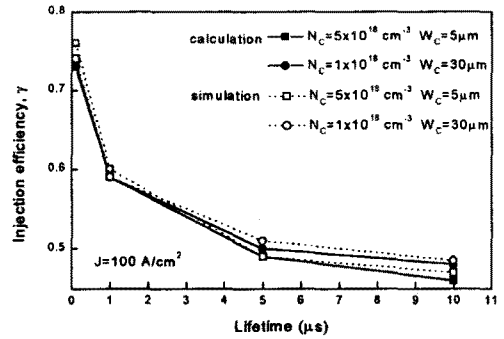


그림 4. lifetime 변화에 따른 홀 전류 주입효율의 변화.

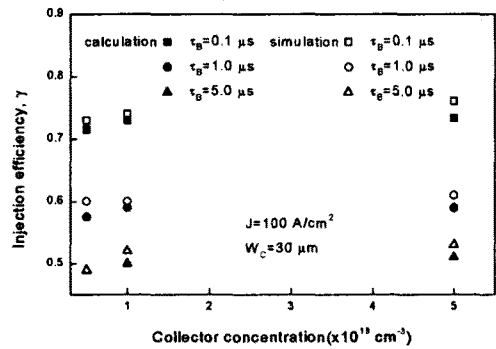


그림 5. 콜렉터 농도와 주입효율과의 관계.

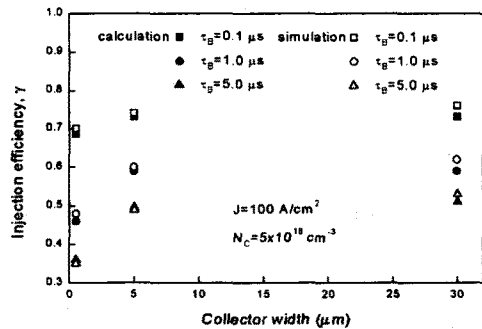


그림 6. 콜렉터 두께와 주입효율과의 관계.