

Calculation of Forward Voltage Drop of IGBTs

崔炳盛* · 鄭相九**
(Byung-Sung Choi · Sang-Koo Chung)

Abstract - A simple method for calculating the forward voltage drop of IGBTs is presented, based on the voltage drops on the p+ body, the reverse biased depletion region between p+body and epi-layer, the epi layer, and the forward biased collector junction. The decrease of the total current density in the epi layer near the p+ body is taken into account. The proposed method allows a simple but accurate determination of the forward voltage drop in IGBTs, avoiding the complex path taken in the previous model for the forward voltage drops on channel, accumulation region, and epi region. Numerical simulations for 1kV and 2kV NPT-IGBT with a uniformly doped collector are shown to support the analytical results.

Key Words : IGBT, Forward voltage drop, Modeling, simulation

1. 서 론

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 전력 MOSFET의 전압 제어 구동방식을 가지며 에피층에 주입된 높은 밀도의 캐리어에 의한 전도도 변조로 전력 바이폴라 트랜지스터의 낮은 순방향 전압강하의 특성을 나타내는 소자이다. 이러한 IGBT의 낮은 순방향전압강하는 IGBT소자의 동작에서 핵심적인 중요성을 갖는다. IGBT의 순방향 전압 전류 특성에 대한 지금까지의 이론적 해석은 VMOS의 경우와 같이 채널영역, 축적영역, 에피영역, 및 p+/n영역에서의 전압강하를 각각 계산하는 4 영역 방법을 사용하였다.[1] 그러나, 이 모델은 MOS 채널 및 축적영역의 전압강하에 의한 변수가 너무 많고 또 에피 영역의 총 전류밀도가 p+ body 부근에서 많이 감소하는 것을 고려하지 않고 일정하다고 가정함으로써 IGBT의 순방향 전압강하계산에서 큰 오차를 나타내는 결점이있다[2][3]. 한편, IGBT에서 콜렉터 접합의 주입효율에 대한 계산에서도 기존의 저 주입시의 관계식[4] 사용하므로써 전도도 효과에 따른 영향을 잘 설명하지 못하였다.

본 논문에서는 NPT(Non-Punch Through)-IGBT의 구조에서 균일한 도핑농도를 가지는 콜렉터로부터 고 주입에 의한 주입효율을 PT-IGBT의 경우[5]와 같이 콜렉터 층의 두께 및 농도에 의한 물리적 변수로 나타내고 p+/n 순방향 접합의 전압강하를 계산하고 p+ body 부근에서의 전류밀도의 감소를 고려하여 에피 영역의 전압강하를 유도하였으며 특히

p+body 부근의 역방향으로 인가된 공핍층에서의 전압강하를 에피층 및 p+ body의 도핑농도의 함수로 나타내어 그 결과를 반도체 소자 시뮬레이터, ATLAS를 이용한 시뮬레이션과 비교하였다.

2. 해석식의 유도

그림 1은 IGBT 내부의 전압강하 성분을 나타내는 단면도이다. 에미터가 접지된 경우 콜렉터에 $V_{CE} \geq 0$ 전압을 인가하면 그림의 경로 ①과 같이 콜렉터로부터 에미터까지의 수직 경로에 따라 p+/n콜렉터접합, 에피영역, 에피영역과 p+body의 n/p+ 접합의 전압강하를 나타낼 수 있으며 그 전체의 합이 IGBT의 순방향 전압강하가 된다. 경로②는 기존의 논문에서 택한 전압강하의 경로이다.

1. n/p+body 접합의 전압강하

에미터를 원점으로 하고 수직방향으로의 거리를 x' 라 할 때 전자 및 홀 전류밀도는 각각 다음의 방정식

$$J_n(x') = qn(x')\mu_n E(x') + qD_n \frac{\partial n}{\partial x'} \quad (1)$$

$$J_p(x') = qp(x')\mu_p E(x') - qD_p \frac{\partial p}{\partial x'} \quad (2)$$

으로 주어진다. 여기서 μ_n 과 μ_p 및 D_n 과 D_p 는 각각 전자와 홀의 이동도 및 확산계수이며 $E(x')$ 는 전계를, q 는 전자의 전하를 나타낸다. p+body부근의 p+n 접합은 콜렉터에

* 準會員 : 亞洲大 大學院 電子工學科 卒業(碩士)
 ** 正會員 : 亞洲大 工大 電子工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 12月 28日
 最終完了 : 2000年 2月 14日

걸린 전압에 의하여 역방향 바이어스가 걸리게 된다. 그림 2는 이 영역의 전계 및 캐리어 분포를 그리고 삽입된 스킷치는 전자농도 분포와 전압변화를 나타낸다. 전자 밀도는 공핍층과 에피영역의 경계면 x'_2 에서의 농도 N_B 로부터 공핍층과 p-body의 경계면 x'_1 의 농도 n_1 으로 급속히 감소하며 에미터와 p-body 접속부에서는 열적 평형상태의 값 $n_{p0}(0)$ 로 다시 증가한다. 공핍층 및 p-body 내부 인 $0 \leq x' \leq x'_2$ 에서 전자의 전류밀도는 $J_n(x')=0$ 이므로 위 식 (1)으로부터

$E(x') = -v_t \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}$ 가 된다. v_t 는 thermal voltage로써 상온에서 약 0.026V의 값을 갖는다. 이로부터 에미터가 접지된 경우 역방향으로 인가된 접합부분 x'_1 에서의 전압 v_1 와 전자의 농도는 식 (3)의 관계가 있다.

$$n_1 = n_{p0}(0) e^{(-v_1/v_t)} \quad (3)$$

여기서, $n_{p0}(0) = n_{ie}(0)^2/N_A(0)$ 이고, $N_A(0)$ 는 $x'=0$ 에서의 p-body의 도핑농도, $n_{ie}(0)$ 는 bandgap narrowing을 고려한 p-body의 유효 진성 캐리어 밀도이다. 식 (3)으로부터 접합에서의 전압 v_1 을 구하면 식 (4)와 같다.

$$v_1 = v_t \ln \frac{n_{p0}(0)}{n_1} \quad (4)$$

위 식은 에미터로부터 공핍층 접합의 시작면까지 p-body에 걸리는 전압을 나타낸다. 동일한 논리로 $x'_1 \leq x' \leq x'_2$ 의 공핍층 영역에서의 전압을 구하면

$$v_2 = - \int_{x'_1}^{x'_2} E(x') dx' = v_t \ln \frac{N_B}{n_1} \quad (5)$$

가 된다. 이 전압은 공핍층 접합 $x' = x'_1$ 에서부터 에피층으로의 공핍층 끝 $x' = x'_2$ 에 걸리는 전압이다. 따라서 공핍층으로부터 에미터까지의 총 전압강하는 식 (4)와 식 (5)의 합으로 주어지며 n_1 은 아주 작은 값이므로 식 (6)과 같이 된다.

$$V_{cell} = v_1 + v_2 = v_t \ln \frac{N_B n_{p0}(0)}{n_1^2} \approx v_t \ln (N_B n_{p0}(0)) \quad (6)$$

2. 에피영역 전압강하

콜렉터 접합면을 원점으로 택하고 수직경로의 거리를 x 라 할 때 균일한 농도 N_B 와 두께 W_B 를 갖는 에피영역에서 순방향 동작시 전도도 변화에 의한 캐리어의 농도분포 $p(x)$ 는 다음과 같은 ambipolar 확산 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$D_a \frac{d^2 p(x)}{dx^2} = \frac{p(x)}{\tau_H} \quad (7)$$

에서 D_a 및 τ_H 는 ambipolar 확산계수 및 캐리어 수명이다.

$p(0) = p_0$ 및 $p(W_B) = N_B$ 로부터 드리프트 영역에서의 캐리어의 농도분포를 구하면 아래와 같다.

$$p(x) = \frac{p_0}{\sinh(W_B/L_B)} \sinh\left(\frac{W_B-x}{L_B}\right) + N_B \quad (8)$$

여기서 $L_B = [D_a \tau_H]^{1/2}$ 로 에피층에서의 ambipolar 확산 거리이다.

균일한 도핑농도 N_c 를 가진 콜렉터에서의 홀 주입효율은 고주입 조건을 적용한 캐리어의 농도관계로부터 유도되며 접합 부분에서의 전자전류 및 홀 전류밀도는 각각 다음 식으로 주어진다[5],[6].

$$J_n(0) = J_{no} p_0^2 \quad (9)$$

$$J_p(0) = J(0)/[b+1] + p_0 J_{pd} \quad (10)$$

여기서,

$$J_{pd} = qD_a/[L_B \tanh(W_B/L_B)] \quad (11)$$

$$J_{no} = qgD_c/[L_c N_c \tanh(W_c/L_c)] \quad (12)$$

여기서 $b = \mu_n/\mu_p$ 로서 전자와 홀의 이동도 비이며 W_c 및 L_c 는 콜렉터의 두께 및 영역의 소수캐리어 확산거리, D_c 는 콜렉터 확산계수, g 는 콜렉터에서의 bandgap narrowing 효과를 나타내는 지수이다[5]. 콜렉터 두께와 농도에 의해 유도된 접합 부분에서의 홀 캐리어의 농도 p_0 와 홀 주입효율 γ 은 각각 다음과 같이 주어진다.[6]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{J_{pd}}{J_{no}}\right)^2 + \frac{4cJ(0)}{J_{no}}} - \frac{J_{pd}}{J_{no}} \right\} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{J_p(0)}{J(0)} = \frac{1}{b+1} + (p_0/J(0))J_{pd} \quad (14)$$

여기서 $c = b/[b+1]$ 이다.

에피영역에서의 전계분포를 구하기 위해 총 전류밀도의 변화를 고려해야 한다. 그림 3은 $J(0) = 100 A/cm^2$ 일 때 전류밀도 $J(x)$ 의 변화를 나타낸 것으로 $J(x) = J(0)$ 의 일정한 영역을 지나 p+ body로 가까이 가면 $J(W_B)$ 로 감소함을 알 수 있다. 일정한 전류밀도 $J(0)$ 로부터 n/p+ 접합의 전류밀도 $J(W_B)$ 에 이르기까지의 전류밀도변화를 다음의 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$J(x) \approx \begin{cases} J(0), & 0 \leq x \leq W_B - W_M \\ J(0) - [J(0) - J(W_B)] \left(\frac{W_B - W_M - x}{W_M}\right)^2, & W_B - W_M \leq x \leq W_B \end{cases} \quad (15)$$

여기서, W_M 은 총 전류가 감소하기 시작하는 에피 영역의 위치를 나타낸다. 이 값은 그림 3(a)는 500V급에서 3000V급까지 각각 다른 에피 층 두께를 갖는 IGBT소자의 전류밀도 변화에 대한 시뮬레이션 결과로 W_M 은 대략 $35 \mu m$ 임을 알 수 있다. 한편 $J(W_B) = J_p(W_B)$ 의 순수 홀 전류밀도이고 MO-S 채널전류는 순수전자전류 밀도로 $J_{MOS} = J(0) - J_p(W_B)$ 이며 이는 콜렉터로부터의 홀 주입에 대한 전자전류와 에피영역에서의 홀과의 재결합에 의한 전자전류의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$J_{MOS} = (1 - \gamma)J(0) + (q/\tau_H) \int_0^{W_B} p(x) dx \quad (16)$$

따라서 홀 및 전자전류밀도의 비로 나타나는 전류이득 $\beta = J_p(W_B)/J_{MOS}$ 을 사용하면 $J(W_B) = J(0)\beta/(\beta + 1)$ 가 됨을 알 수 있다. 그림 3(b)는 이때 식(15)을 사용한 결과를 시뮬레이션의 그것과 비교 한 것이다. 식 (16)에 의한 에피 영역에서의 전계 분포는 식 (1)과 (2)로부터 $n(x)=p(x)$ 을 이용하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$E(x) = \frac{J(x)}{q(\mu_n + \mu_p)p(x)} - \frac{D_n - D_p}{(\mu_n + \mu_p)p(x)} \frac{dp}{dx} \quad (17)$$

$$0 \leq x \leq W_B$$

식(15)을 이용하여 에피 영역의 총 전압강하를 구하는 식은 식(17)을 사용하면 $V_{epi} = -\int_0^{W_B} E(x) dx$ 로 주어지며 수치적으로 그 값을 구할 수 있다.

콜렉터와 에피 접합 p+/n에서의 전압강하는 순방향 동작시 built-in 전압과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{p+/n} = V_{bi} - V_a$$

$$= v_i \ln \frac{N_C N_B}{n_i^2} - v_i \ln \frac{p_o N_B}{n_i^2} = v_i \ln \frac{N_C}{p_o} \quad (18)$$

콜렉터 접합에서의 전계는 에피 층의 전계 및 p+body 접합에서의 전계와는 정 반대방향으로 에피층에서 콜렉터 쪽으로 향하므로 위에서 유도한 전압강하에 대한 식을 모두 합하여 IGBT의 내부에서의 총 전압강하를 구하면 다음과 같다.

$$V_{CEsat} = V_{cell} + V_{epi} - V_{p+/n} \quad (19)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

표 1에 시뮬레이션에 사용된 변수를 기술하였다. 표의 변수들은 고정된 변수들이며 1000V 급, 2000V 급 IGBT에서 모두 동일하게 사용되었다. 고정된 변수들 이외의 변수들은 전도도 변화에 의한 효과를 얻기 위해 Shockley-Read- Hall recombination model을, 전도도 및 내부 전계에 의존하는 경향을 얻기 위해 concentration dependent mobility 및 field dependent mobility를 그리고 MOS gate에서의 효과를 얻기 위해 surface mobility를 적용하였다. 또한 collector의 농도가 $10^{17}/cm^3$ 보다 매우 크므로 bandgap-narrowing 모델을 사용하였다.

그림 4는 게이트에 15 V의 전압을 인가하고 에피 영역의 총 전류밀도 $J(0) = 100 A/cm^2$ 일 때 $J(x) = J(0)$ 로 일정한 경우와 식 (15)에 의한 $J(x)$ 의 감소를 고려한 경우에 에피영역에서의 전계 분포 계산결과를 시뮬레이션과 비교하여 나타낸 것이다. 기존의 $J(x) = J(0)$ 모델이 시뮬레이션에 비하여 큰 전계를 나타내는 것에 비해 $J(x)$ 의 감소를 고려한 경우의 전계 분포는 그림에서 보는 바와 같이 시뮬레이션과 거의 같은 값을 나타 내고있다. 그림에서 우측 끝 부분의 점선은 콜렉터 접합의 전계 분포이며 순 방향으로 인가되어 있으므로 실제 이 영역의 전계방향은 에피층의 그것과는 정

표 1 시뮬레이션에 사용된 변수

Table 1 Device Parameters used in Simulation

사용 변수	값
n+ 소오스 농도	$1 \times 10^{20} cm^{-3}$
n+ 접합 깊이	$1 \mu m$
p+ body 농도	$2 \times 10^{19} cm^{-3}$
p+body 접합 깊이	$5 \mu m$
p-body 농도	$1 \times 10^{18} cm^{-3}$
p-body 접합깊이	$3 \mu m$
게이트 산화막 두께	1000 Å
p+콜렉터 농도	$5 \times 10^{18} cm^{-3}$
p+콜렉터 두께	$30 \mu m$
셀 폭	$20 \mu m$

반대 방향이다. 그림 5는 전류밀도가 $100 A/cm^2$ 일 때 캐리어 수명에 따른 전압강하의 계산 결과를 시뮬레이션과 비교하여 나타낸 것이다. 순방향 전압강하는 캐리어 수명이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 캐리어 수명이 10 μs 이상인 경우엔 전압강하가 일정한 값으로 수렴하게 되는 데 이는 에피 영역의 전압은 거의 무시할 정도로 작아지며 공핍층에서의 전압강하가 거의 대부분을 차지하는 데 이 값이 캐리어 수명과는 무관하게 일정하므로 그 값에 수렴하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

p+body 와 에피층의 접합에서 역 방향으로 인가된 공핍층의 전압강하를 나타내는 해석식과 p+body 부근 에피층에서의 총 전류밀도의 감소를 고려하여 에피층의 전압강하를 계산하는 방법으로 IGBT의 순방향 전압강하를 결정하고 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 증명하였다. 제안된 해석적인 방법은 기존의 채널 영역, 축적영역, 에피영역, p+/n 접합의 4성분으로 나눈 전압강하 계산방법에 비해 사용된 변수의 수가 적고 매우 간단하다. 1000 V 및 2000 V급 IGBT 소자의 시뮬레이션을 통해 전류밀도와 소수캐리어 수명에 따른 순방향 전압강하의 변화를 조사한 결과 콜렉터전류가 $100 A/cm^2$ 인 경우 소수캐리어수명이 1 μs 일 때 시뮬레이션과 각각 약 4 %, 4.3 % 그리고 소수캐리어수명이 20 μs 일 때 각각 3.8 %, 7 % 의 오차를 갖고 시뮬레이션 결과와 잘 일치하므로 앞으로 IGBT 순방향 전압강하의 계산에 매우 유용하리라 생각된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] S. D. Kim, I. J. Kim, M. K. Han, Y. I. CHOI, "An accurate on-resistance model for low voltage VDMOS devices,"

Solid-State Electronics, Vol. 38, No. 2, pp. 345-350, 1995.
 [2] D. S. KUO, CHENMING HU, "An analytical model for the power Bipolar-MOS Transistor," Solid-State Electronics, Vol. 29, No. 12, pp. 1229-1237, 1986.
 [3] Y. YUE, J. J. LIU, and I. BATARSEH, "An analytical insulated-gate bipolar transistor(IGBT) model for steady-state and transient applications under all free-carrier injection conditions," Solid-State Electronics, Vol. 39, No. 9, pp. 1277-1282, 1996.
 [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] 최병성, 정상구, "IGBT의 콜렉터 구조에 따른 홀 주입효율의 변화", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 D, pp. 1956-1958, 1999.

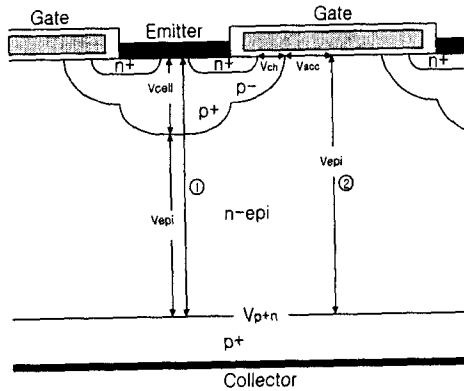


그림 1 IGBT 단면도.
 Fig. 1 Cross section of IGBT.

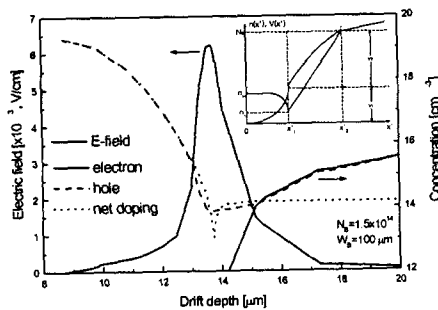
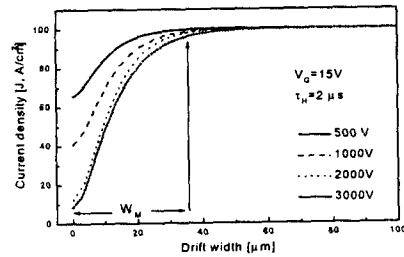
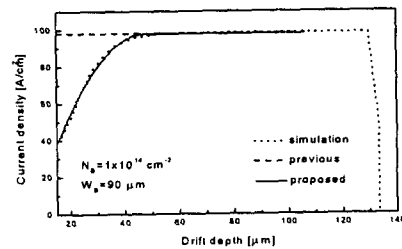


그림 2 P+ body에서의 전계와 캐리어 농도 분포 및 전자분포와 전압변화의 스케치
 Fig. 2 Electric field and carrier concentration in the p+ body region and sketch for electron concentration and potential variation.



(a)



(b)

그림 3 에피 영역에서 총 전류밀도의 변화 및 근사식의 비교.

- (a) 에피 영역에서 총 전류밀도의 변화
- (b) 근사식과의 비교

Fig. 3 Change of total current density and comparison with the model.

- (a) Change of total current density
- (b) Comparison with the model.

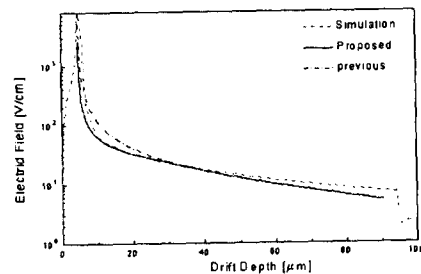


그림 4 에피층의 전계분포

Fig. 4 Electric field distribution in epi layer

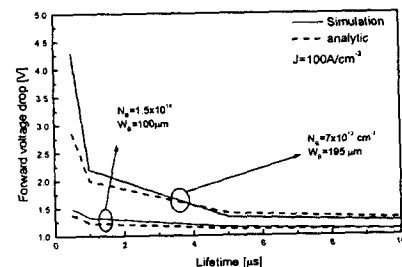


그림 5 IGBT의 순방향 전압강하와 캐리어 수명

Fig. 5 Forward voltage drop and high level carrier lifetime of IGBT's.