

가우시안 농도 분포를 갖는 PT-IGBT의 에미터 주입효율

김정희, 최연익, 정상구
아주대학교 전자공학과

Emitter Injection Efficiency of Gaussian Impurity Distributions in PT-IGBT

Chung-Hee Kim, Yearn-Ik Choi, Sang-Koo Chung
School of Electronics Engineering, Ajou University

Abstract - Emitter injection efficiency of p+/n-buffer junction with Gaussian impurity distribution is presented. This model takes into account the variation of the carrier lifetime with injection level which allows a unified interpretation of the injection efficiency for all injection level. The injected carrier density and injection efficiency of the anode are calculated as a function of the current density with the low level lifetime as a parameter for different thicknesses of the anode. The analytical results agree well with simulation.

1. 서 론

P+/n-버퍼 접합은 높은 항복전압을 얻고 전류손실과 스위칭손실을 줄이기 위해 PT(punchthrough)개념을 사용하는 전력 소자에서 주로 사용된다[1]. 상대적으로 높은 도핑 농도를 갖는 버퍼층안에서 전기장은 p+어노드층에 도달할 때 사다리꼴 모양이 된다. 이것은 버퍼층이 없는 NPT(nonpunchthrough)구조에 비해 웨이퍼 두께와 저장되는 전하(stored charge)의 감소를 가능케 한다[2]. 얇은 어노드층은 턴오프시 잉여 전하(excess charge)를 어노드층의 금속부분으로 끌어낼 때 효과적이다. 그로 인해 전자가 p+어노드층을 통과할 때 재결합이 최소화되고 또한 그에 부합되는 홀주입을 최소화할 수 있다. 그러므로 PT소자들에서 p+/n-버퍼 접합의 주입 효율을 결정하는 것은 매우 중요하다.

기존의 논문은 균일하게 도핑된 p+/n-버퍼 접합을 갖는 PT구조에서 에미터 주입효율을 계산하였다[3]. 본 논문에서는 가우시안 농도 분포를 갖는 p+/n-버퍼 접합부분의 주입효율을 캐리어의 주입양에 따른 캐리어 수명을 사용하여 계산하였다. 어노드로부터 주입된 캐리어 양과 p+/n-버퍼의 주입효율을 저준위수명을 사용하는 총전류밀도의 함수로 계산하고 어노드의 두께를 변화시켜 해석식으로부터 얻은 결과를 반도체소자 시뮬레이터인 MEDICI의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석적 식의 유도

그림 1은 시뮬레이션에 사용된 가우시안 농도분포의 p+/n-버퍼 접합을 갖는 PT(Punch Through) IGBT(Insulated Gate Bipolar Trnsistor)의 농도분포와 단면도이다.

그림 2는 p+/n-버퍼부분의 캐리어분포를 보여준다. 홀과 전자농도는 어노드에서는 $n_a(x')$ 와 $p_a(x')$ 로 버퍼에서는 $n_b(x)$ 와 $p_b(x)$ 로 표현된다. 두께가 W_a 인 p+어노드층과 n-버퍼층이 가우시안 농도 분포를 갖을경우 접합사이에서의 농도는

$$N_A(x') = N_{AP} \exp\left[-\frac{(x' - W_a)^2}{2\sigma_a^2}\right] \quad (1)$$

$$N_B(x) = N_{BP} g(x) \quad (2)$$

인 관계가 있다. 여기서,

$$g(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_b^2}\right] - \exp\left[-\frac{-x(x+2W_a)^2}{2\sigma_a^2}\right] \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 N_{AP} 와 N_{BP} 는 어노드층과 버퍼층안에서의 가우시안농도분포의 첨두치이고 σ_a 와 σ_b 는 그들의 확장변수이다. 전하중성조건은

$$n_b(x) = p_b(x) + N_B(x) \quad (4)$$

이다. $x_n + x_p$ 는 공핍폭을 의미하므로 따라서 유효 어노드의 두께는 $W_{ae} = W_a - x_p$ 로 감소하게 된다. $x'=0$ 에서 계산된 전자전류밀도와 $x=0$ 에서의 캐리어양은

$$J_n(0) = J_{no} p_0 (p_0 + g_0) \quad (5)$$

인 관계가 있다[3]. 여기서 $p(x) = p_b(x)/N_{BP}$ 에서의 $p_0 = p(0)$ 와 $g_0 = g(0)$.

$$J_{no} = \frac{qhD_{eff}N_{BP}^2}{N_{AP}L_a \tanh(W_{ae}/L_a)} \quad (6)$$

를 사용한다. 여기서 L_a 는 전자의 확산길이, D_{eff} 는 어노드안에서의 유효확산상수를 표현하고 $h = n_{ie}^2(0)/n_i^2$ 는 bandgap narrowing에 의한 효과를 포함하며 높게 도핑된 어노드층에서의 정규화된 유효진성농도를 나타낸다. 버퍼층안에서 전자와 홀전류밀도는 다음의 식을 사용하여 표현할 수 있다.

$$F(p, g) = \frac{qD_p c N_{BP} [(2p+g) \frac{dp}{dx} + p \frac{dg}{dx}]}{p+cg} \quad (7)$$

$$J_n(x) = \frac{cK(p+g)}{p+cg} + F(p, g) \quad (8)$$

$$J_p(x) = \frac{c'K(p+g)}{p+cg} - F(p, g) \quad (9)$$

여기서 $c = b/(1+b)$, $c' = 1-c$ 이고 또한 전자와 홀의

이동도비 $b = \mu_n / \mu_p = D_n / D_p$ 를 사용한다. 높게 도핑된 p와 n형 반도체에서 소수캐리어수명(minority carrier lifetime)의 비인 ζ 와 저준위수명(low level lifetime)을 표현한 τ_{LL} 를 사용하여 주입의존수명(injection dependent lifetime)을 나타내면

$$\tau_p(p) = \tau_{LL} \left[1 + \zeta \frac{p}{p+g} \right] \quad (10)$$

가 된다. 이를 사용한 홀의 연속방정식

$$\frac{dJ_p(x)}{dx} = \frac{-qN_{BP}p(x)}{\tau_p(p)} \quad (11)$$

은 비선형미분방정식인

$$p(p+cg) \frac{d^2g}{dx^2} + [(2c-1) \frac{dp}{dx} + c \frac{dg}{dx} - a][g \frac{dp}{dx} - p \frac{dg}{dx}] + (2p+g)(p+cg) \frac{d^2p}{dx^2} - \frac{p(p+cg)^2}{cD_p\tau_p(p)} = 0 \quad (12)$$

를 이끌어낸다. 여기서 $a = c'J/[qD_pN_{BP}]$ 로 주어진다. 버퍼층 내부의 공간전하층 끝에서 이 미분방정식의 해는 $(dg/dx)_{x=0} = 0$ 인 $x=0$ 을 택하면

$$p(x) = A \exp\left[-\frac{x}{L_b}\right] - \frac{p_0g(x)}{2p_0+g_0} \quad (13)$$

가 된다. 여기서 $A = p_0[1+g_0/(2p_0+g_0)]$ 가 되고 $1/L_b = [-f_2 + (f_2^2 - 4f_1f_3)^{1/2}]/2f_1$ 가 된다. f_1, f_2, f_3 를 구하면

$$f_3 = \frac{p_0(p_0+cg_0)^2}{L_a^2} \quad (14)$$

$$f_2 = A \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

$$f_1 = A[(p_0+0.5g_0)(p_0+cg_0) + A(c-0.5)g_0] \quad (16)$$

가 되고 $L_b^2 = 2cD_p\tau_p(p_0)$ 로 주어진다.

결국, $x=0$ 에서 총전류밀도는 다음과 같이 표현되므로

$$J = \frac{J_{nc}p_0(p_0+cg_0)}{c} + qD_pN_{BP}p_0 \frac{2p_0+g_0}{(p_0+g_0)L_b} \quad (17)$$

주입효율 $\gamma = 1 - J_n(0)/J$ 와 주입양 p_0 는 τ_{LL} 를 사용하는 J 의 함수로 각각 표현된다.

2.2 Simulation 및 계산결과

가우시안 농도 분포를 갖는 p+/n-버퍼 접합의 PT-IGBT에 대하여 반도체소자 시뮬레이터인 MEDICI를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

어노드의 전류밀도가 변함에 따라 캐리어분포뿐만 아니라 홀과 전자의 전류밀도도 각각 변화하였다. 그림 3은 정규화되어진 주입된 캐리어 양에 대한 전자 전류의 식(5)에 의하여 계산된 결과와 어노드의 침투도핑농도를 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 버퍼의 침투도핑농도를 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 으로

고정시키고 버퍼 두께를 $30 \mu\text{m}$, 어노드의 두께를 각각 $3 \mu\text{m}$, $6 \mu\text{m}$ 인 소자에서 시뮬레이션한 결과를 함께 보여준다.

그림 4는 어노드 두께가 다른 두 p+/n-버퍼 구조에 대하여 홀과 전자의 소수캐리어 수명이 각각 $\tau_{p0} = 10 \mu\text{s}$, $\tau_{n0} = 2.5 \mu\text{s}$ 인 경우 $\zeta = 4$ 일 때 시뮬레이션 결과와 해석적인 결과를 함께 나타내고 있다. 여기서 해석적인 식의 곡선들은 어노드층의 두께에 따라 변하는 τ_{LL} 을 사용하여 총전류밀도에 대한 에미터 주입 효율과 주입된 캐리어 밀도의 변화를 시뮬레이션 결과와 잘 맞는 값으로 택한다. 해석적인 식과 시뮬레이션이 잘 일치하여 어노드의 두께에 의한 영향을 잘 설명하고 있다. 즉, 어노드의 두께가 두꺼울수록 주입 효율은 커지게 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

가우시안 농도분포를 갖는 PT-IGBT의 에미터 주입효율의 해석적 모델을 제시하였다. 그리고 어노드층의 두께에 의한 영향을 시뮬레이션 결과와 비교하여 식의 타당성을 검증하였다. 버퍼층안에서의 캐리어 분포의 영향으로 p+어노드의 두께가 $3 \mu\text{m}$ 인 소자가 $6 \mu\text{m}$ 인 소자보다 주입효율이 더 낮음을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. J. Baliga, "Trends in power semiconductor devices," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 43, pp. 1717-1731, Oct. 1996.
- [2] V. Benda, et al., *Power Semiconductor Devices*, JOHN WILEY & SONS, pp 257-258, 1999.
- [3] S. K. Chung, "Injection Currents Analysis of p+/n-Buffer Junction," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 45, pp 1850-1854, Aug. 1998.

This work was supported by the Brain Korea 21 Project. The author would like to thank Ajou University for providing the research equipment.

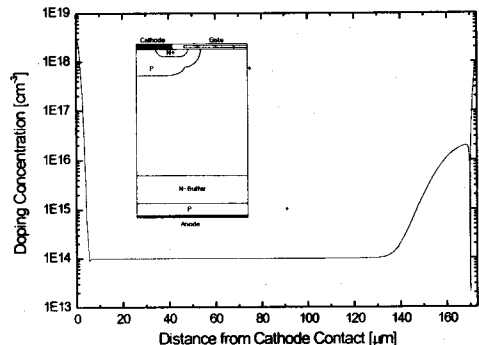


그림 1. PT-IGBT의 단면도와 농도 분포

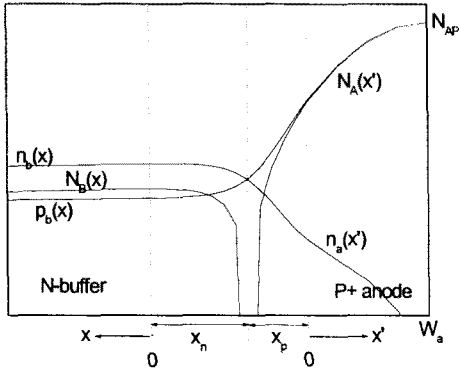


그림 2. p+/n-버퍼부분의 캐리어와 불순물 농도 분포

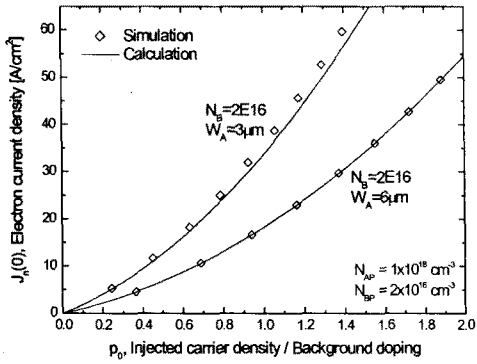


그림 3. 주입양 p_0 에 따른 전자전류밀도 $J_n(0)$ 의 변화

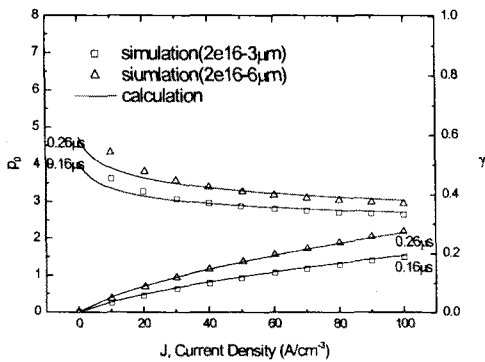


그림 4. 전류밀도에 대한 캐리어 주입양과 주입효율 γ 의 변화.