

접합구조에 따른 AlGaAs/GaAs HBT의 DC 특성에 관한 연구

DC Characteristics of AlGaAs/GaAs HBTs

with different Emitter/Base junction structures

김광식, 유영한, 안형근, 한득영

(Kwang-Shik Kim, Young-Han Yu, Hyung-Kuen Ahn, Duek-Young Han)

Abstract

In this paper, all SCR recombination currents including setback and graded layer's recombination currents are analytically introduced for the first time. Different emitter-base structures are tested to prove the validity of the model. In 1995, the analytical equations of electric field, electrostatic potential, and junction capacitance for abrupt and linearly graded heterojunctions with or without a setback layer was derived. But setback layer and linearly graded layer's recombination current was considered numerically. In this paper, recombination current model included setback layer and graded layer is proposed. New recombination current model also includes abrupt heterojunction's recombination current model. In this paper, new recombination current model analytically explains effects of setback layer and graded layer.

Key Words(중요용어) : HBT, Setback layer, Graded layer, recombination current, Current gain

1. 서론

Si 트랜지스터와 GaAs 전계효과 트랜지스터(Field Effect Transistor, FET)는 마이크로파 집적 회로에서 기본적인 소자로 여러 분야에 걸쳐 사용되어 왔다. 그러나 좀더 높은 주파수에 대한 요구에 따라 새로운 소자로서 이종접합구조(Heterojunction structure)의 발전에 의해 고속 전자 이동 트랜지스터(High Electron Mobility Transistor, HEMT)와 이종 접합 쌍극자 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)가 새로운 소자로서 각광을 받게 되었으며 그 활용 분야가 점차적으로 확대되고 있다.

HBT는 1951년 Shcokley에 의해 처음 제안되었으며, Kroemer에 의해 구체화 되었고[4][5], 그 뒤로 많은 연구가 수행되어져 왔고, Ebers-Moll 모델[1], Gummel-Poon 모델[2], New charge control 모델[3] 등 많은 해석적인 모델이 제시되었다. 또한 Abrupt HBT의 공핍영역 재결합 전류에 대한 해석적인 모델이 제시되었다.[10][11]

본 연구에서는 Npn AlGaAs/GaAs HBT에서 에미터-베이스 접합의 구조에 따른 전기적 특성의 변화를 살펴보았다. 에미터-베이스 접합 구조는 Al mole fraction을 변화시킨 graded layer와 undoped setback layer의 유무에 따라 달라지게 된다. 기존의 모델[8][9]은 graded layer와 undoped setback layer의 재결합 전류를 수치해석적으로 모델링함으로써 완벽한 해석적인 모델을 제시하지 못하였다.

본 연구의 목적은 기존의 공핍영역의 재결합 전류의 모델을 이용하여 graded layer와 undoped

* 건국대학교 전기공학과
(서울 특별시 광진구 화양동 1번지 건국대학교,
Fax: 02-447-9186
E-mail : tbontb@pof.konkuk.ac.kr

setback layer의 재결합 전류의 해석적 모델을 만들고, HBT의 DC 특성을 분석하는데 있다.

2. Model equation

2.1 Collector current의 분석

그림 1과 같은 HBT의 구조에서, 에미터와 베이스 공핍층 끝에서 콜렉터 전류는 식(1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) = J_n(-X_g) - (J_{SCRG} + J_{SCRS} + J_{SCR2}) \quad (1)$$

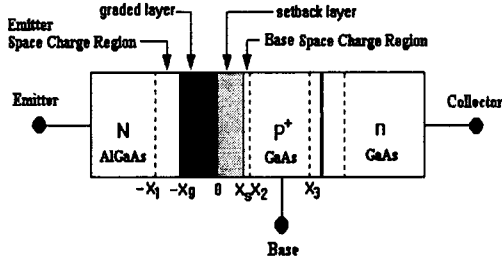


그림 1. N/p/n HBT의 단면도

이중 접합면을 가로지르는 전자의 전류밀도 (electron current density)는 이중접합 양쪽의 전자의 흐름 (electron flux)의 차로써 구해 질 수 있고, 이것은 식(2)와 같이 나타내어진다.[6]

$$J_n(-X_g) = qv_n\gamma_n [n(-X_g^-) - n(-X_g^+) \exp(-\Delta E_c/kT)] \quad (2)$$

$$= qv_n\gamma_n \{ N_E \exp(-qV_{B1}/kT) - n(X_2) \exp[q(V_{B2} + V_{BS} + V_{BGC})/kT] \}$$

여기서, v_n 은 전자의 평균 thermal velocity의 1/4값을 의미하며, γ_n 은 전자의 tunnelling coefficient, ΔE_c 는 conduction band discontinuity, $V_{B1} = -V_1(-X_g)$, $V_{B2} = -[V_2(X_2) - V_S(X_S)]$, $V_{BS} = -[V_S(X_S) - V_g(0)]$, $V_{BGC} = -\Delta E_c/q - V_g(0) + V_1(-X_g)$ 이다.

준중성 베이스에서는 콜렉터 전류를 확산에 의한 전류로 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) \approx \frac{qD_n n(X_2)}{X_3 - X_2} \quad (3)$$

베이스 쪽의 에미터-베이스 공핍영역 끝에서 the-rmionic emission에 의한 전류와 확산에 의한 전류는 연속하므로, 베이스 쪽의 에미터-베이스 공핍영역 끝에서의 전자의 농도를 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$n(X_2) = \frac{v_n\gamma_n N_E \exp(-qV_{B1}/kT) - (J_{SCRG} + J_{SCRS} + J_{SCR2})}{D_n/(X_3 - X_2) + v_n\gamma_n \exp[q(V_{B2} + V_{BS} + V_{BGC})/kT]}$$

콜렉터 전류, $J_C(X_2)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) = \frac{qv_n\gamma_n N_E \exp(-qV_{B1}/kT) - (J_{SCRG} + J_{SCRS} + J_{SCR2})}{1 + v_n\gamma_n \exp[q(V_{B2} + V_{BS} + V_{BGC})/kT]} \frac{(X_3 - X_2)}{D_n} \quad (5)$$

2.1 SCR recombination current의 분석

SCR recombination은 다음과 같이 그림 1의 네 구간에 대하여 식(7)과 같이 분석되어진다.

$$J_{SCR} = q \int_{-x_1}^{-x_g} R dx + q \int_{-x_g}^0 R dx + q \int_0^{x_1} R dx + q \int_{x_1}^{x_2} R dx \quad (7)$$

$$= J_{SCR1} + J_{SCRG} + J_{SCRS} + J_{SCR2}$$

여기서, R 은 Shockley-Read-Hall Recombination Rate이이고, 식 (8)과 같이 정의된다.

$$R = \frac{n_i}{\sqrt{\tau_{p0}\tau_{n0}}} \quad (8)$$

$$\frac{\sinh\left(\frac{E_{FN} - E_{FP}}{2kT}\right)}{\cosh\left[\frac{1}{kT}\left(E_i - \frac{E_{FN} + E_{FP}}{2}\right) + \ln\sqrt{\tau_{n0}/\tau_{p0}}\right]} + \exp[(E_{FN} - E_{FP})/2kT] \cosh\left[\frac{E_T - E_i}{kT} + \ln\sqrt{\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}}}\right]$$

여기서, E_{FN} , E_{FP} 은 Quasi-Fermi level과 τ_{n0} , τ_{p0} 은 공핍영역에서의 life time이다.[12][13]

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 HBT는 에미터 도핑농도

$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 베이스 도핑농도 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 를 사용하였다.

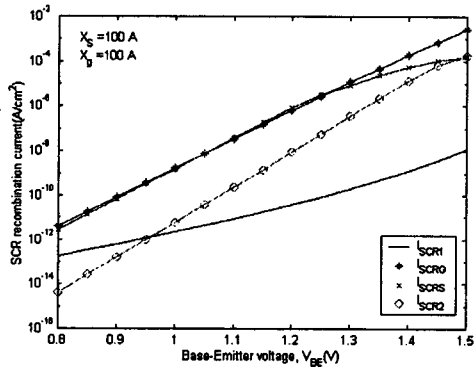


그림 2. 전압에 따른 SCR recombination current의 변화

그림 2와 같이 setback layer와 graded layer가 포함된 HBT에서 recombination의 발생분포는 abrupt junction에 추가된 두 개의 층에서 보다 많이 발생해, 전류이득에 영향을 줄 것으로 예상되어진다.

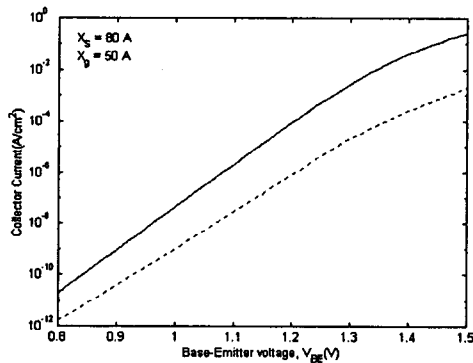


그림 3. 전압에 따른 콜렉터 전류와 베이스 전류의 변화 ($X_s = 50 \text{ A}$, $X_g = 80 \text{ A}$)

그림 3은 전압에 따른 콜렉터 전류와 베이스 전류의 변화를 보여준다.

그림 4는 graded layer의 두께와 전류이득의 상관성을 보여준다. 전류이득은 graded layer의 두께가 증가함에 따라 증가하지만, 150Å 이상을 증가하면, 오히려 감소하는 추세를 보인다. 이것은 graded layer의 recombination current의 영향으로 인한 전류이득의 감소이다.

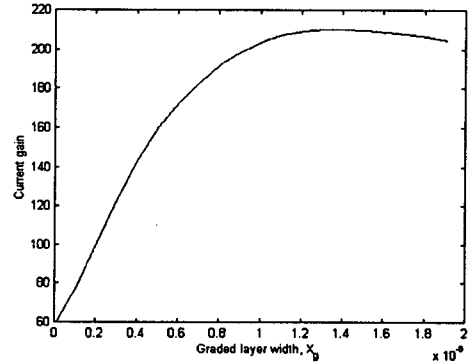


그림 4. Graded-layer 두께의 변화에 따른 전류이득

4. 결론

1. 본 연구에서 다양한 Emitter-Base구조를 갖는 HBT의 전기적 특성을 분석하였다.
2. 본 연구에서는 기존 논문[8] model의 Numerical한 점을 보완한 완전한 해석적 model을 제시하였다.
3. 본 연구에서 기존의 Abrupt junction HBT에만 적용된 해석적 모델[11]을 포함하는 보편적인 모델을 제시하였다.

참고 문헌

- [1]. Lundstorm, M.S., "An Ebers-Moll Model for the Heterostructure Bipolar Transistor", Solid-State Electron., Vol. 29, 1986, pp.1173-1179
- [2]. Ryum, B. R. and Abdel-Motaleb, I. M., "A Gummel-Poon Model for Abrupt and Graded Heterojunction Bipolar Transistor(HBT's)", Solid-State Electron., Vol. 33, 1990, pp.869-880
- [3]. Parikh, C.D. and Lindholm, F. A., "A New Charge-Control Model for Single and Double-Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE Trans. Electron Device, Vol. 39, 1992, pp.1303-1311.
- [4]. Kroemer, H., "Heterojunction Bipolar Transistor and Integrated Circuits", Proc. IEEE, Vol. 70, 1982, pp.13-25
- [5]. Kroemer, H., "Theory of a Wide-Gap Emitter for Transistors", Proc. IRE, Vol. 45, 1957,

pp.1535-1537

- [6]. Grinberg, A. A., Shur, M.S., Fisher, R.J. and Morkoc, H., "An Investigation of the Effect of Graded Layers and Tunneling on the Performance of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE Trans. Electron Device, Vol. ED-31, 1984, pp.1758-1764
- [7]. Yang, K., East, J. R. and Haddad, G. I., "Numerical Modeling of Abrupt Heterojunctions Using a Thermionic-Field Emission Boundary Condition", Solid-State Electronics, Vol. 36, 1993, pp.321-330
- [8]. Liou, J.J., Ho, C.-S., Liou, L. L. and Huang, C. I., "An Analytical Model for Current Transport in AlGaAs/GaAs Abrupt HBTs with a Setback Layer", Solid-State Electron., Vol. 36, 1993, pp.819-825
- [9]. J. S. Yuan and J. Ning, "Analysis of abrupt and linearly graded heterojunction bipolar transistors with or without a setback layer", IEEE Proc G, 142, 252 (1995)
- [10]. C. D. Parikh and F. A. Lindholm, "Space-charge region recombination in heterojunction bipolar transistors", IEEE Trans. Electron Devices, ED-39, 2197 (1992)
- [11]. S. Searles and D. L. Pulfrey, "An Analysis of space-charge-region recombination in HBTs", IEEE Trans. Electron Devices, ED-41, 476 (1994)
- [12]. D. L. Pulfrey and S. Searles, "Electron quasi-Fermi level splitting at the base-emitter junction of AlGaAs/GaAs HBT", IEEE Trans. Electron Devices, ED-40, 1183 (1993)
- [13]. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., Wiley, New York (1981)