

論文93-30A-3-9

이종접합 쌍극성 트랜지스터의 Ebers-Moll 모델

(An Ebers-Moll Model for Heterojunction Bipolar Transistor's)

朴光旻*, 郭桂達**

(Kwang Mean Park and Kae Dal Kwack)

要 約

본 논문에서는 이종접합 쌍극성 트랜지스터(HBT)의 간단한 Ebers-Moll 모델을 제시한다. 이를 위해 npn형 HBT의 모델 구조를 사용하여 전류 - 전압 특성을 해석하였으며, 구해진 단자전류로부터 HBT의 Ebers-Moll 방정식을 유도하였다. 이때 이종접합 구조에 대한 물리적 파라미터를 동종접합 구조의 파라미터로 대체함으로써 동종접합 소자의 모델로도 사용할 수 있게 하였기 때문에, 단일 또는 이중 이종접합 구조를 갖는 HBT의 특성 해석에 모두 사용할 수 있게 하였으며, 모델 파라미터들이 소자 파라미터에 직접 연관되게 함으로써 HBT의 특성을 최적화하는 데 사용될 수 있게 하였다. 본 모델을 사용하여 simulation한 결과는 실험 데이터와 잘 일치하였다.

Abstract

In this paper, a simple Ebers-Moll model for the heterojunction bipolar transistor is presented. Using the model structure for the npn type HBT, the current-voltage characteristics was analyzed. And from the obtained terminal currents, the Ebers-Moll equations were derived. Then substituting the physical parameters for heterojunction to those for homojunction, this model would be used to analyze the characteristics of single and/or double heterojunction HBT's. And directly relating model parameters to device parameters, it would be also used to optimize the characteristics of HBT's. The simulated results using this model were in good agreement with experimental data.

1. 서 론

최근, MBE 또는 MOCVD 등과 같은 단결정 성장 기술이 발전되면서 HEMT 또는 HBT와 같은 이

종접합 구조를 갖는 소자에 대한 관심이 집중되고 있다. ^[1,2] 이들 소자들은 고속성과 저전력 소모 특성 등에 의해 고속 디지털 응용 분야와 초고주파 응용 분야에서 매우 유용한 것으로 입증되어 이들 소자들의 성능 향상을 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. ^[3-6] 특히 HBT는 GaAs MESFET 또는 HEMT 등과 같은 전계 효과 트랜지스터에 비해, 전자 천이 시간이 lithography 기술 보다는 Epi 성장 기술에 의해 지배되므로 적절한 공정을 통해 높은 f_T 특성을 얻을 수 있으며, 또한 Emitter 면적 전체를 통해 전류가 흐르므로 고전류를 다룰 수 있고, 높은 transconductance 특성을 얻을 수 있다는 장점들로 인해 특

*正會員, 順天鄉大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Soonchunhyang Univ.)

**正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)
(*이 논문은 1990년도 교육부 학술 연구 조성비 (지방대 육성 연구비)에 의하여 연구 되었음)
接受日字: 1992年 9月 1日

히 MMIC 및 고속 디지털 IC 응용 분야에서 매우 유망한 소자로 알려져 있다.^[3] 따라서 HBT의 성능 향상과 HBT를 이용한 회로 및 소자 설계를 최적화하기 위한 소자 특성 모델의 필요성이 증대되어 이에 관한 많은 연구가 있어왔다.^[3-7]

Ebers-Moll 모델은 1954년 J.J.Ebers와 J.L.Moll이 BJT에 대해 처음 발표한 이후^[6], 불순물 도핑 농도, Base 폭, 캐리어의 lifetime 등의 모든 파라미터들이 직접 특성 모델과 연관되기 때문에 BJT의 특성 분석 및 설계, 그리고 이를 이용한 회로의 특성을 예측하고 설계를 최적화하는 데 가장 널리 사용되어 왔다.

본 논문에서는 npn형 HBT의 기하학적 모델 구조를 사용하여 HBT의 전류-전압 특성을 해석하고, 구해진 단자전류로부터 HBT의 Ebers-Moll 모델을 개발한다. 이때 소자의 모델 파라미터들을 소자의 구조와 재료의 성질에 직접 연관시킴으로써 HBT의 특성을 최적화하는 데 사용될 수 있게 한다. 또한 구해진 모델을 사용하여 simulation한 결과를 실험 데이터와 비교함으로써 본 모델의 타당성 및 정확성을 입증한다.

II. HBT의 전류-전압 특성

먼저 HBT의 기하학적 구조를 다음 그림 1과 같이 모델화하여 HBT의 전류-전압 특성을 해석한다.

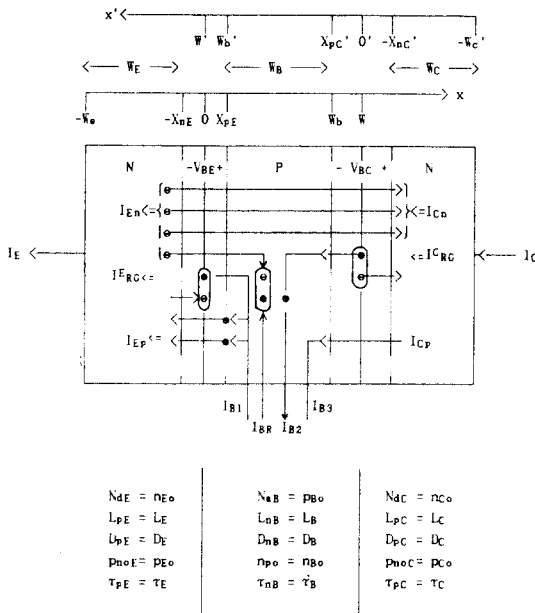


그림 1. npn형 HBT의 모델 구조
Fig. 1. Model structure for npn-HBT.

1. 단자 전류의 계산

1) Emitter 전류

HBT의 Emitter 전류 I_E 는 Emitter에서 Base로 주입되는 전자에 의한 전류 성분 I_{En} 과, Base에서 Emitter로 역 주입되는 호홀에 의한 전류 성분 I_{Ep} 및 Emitter 접합의 공핍층 내의 생성-재결합 전류 성분 I_{RC} 의 합으로 구성된다. 이때 전자 전류 성분 I_{En} 과 호홀 전류 성분 I_{Ep} 는 Emitter 접합에서 확산 방정식을 풀어 구할 수 있다.

(1) 전자 전류 성분 I_{En}

정상 상태에서, Emitter 전류 I_E 의 전자 전류 성분 I_{En} 을 구하기 위해 Emitter 접합에서 전자에 대한 확산 방정식 (1)을 풀면 Base 영역 내의 위치 x 에 따른 과잉 전자의 분포 $\delta n_B(x)$ 는 다음 식 (2)와 같이 구해진다.

$$D_B \frac{d^2 \delta n_B(x)}{dx^2} - \frac{\delta n_B(x)}{\tau_B} = 0 \quad x_{pE} \leq x \leq W_b \quad (1)$$

$$\delta n_B(x) = \frac{1}{\sinh\left[\frac{W_b - x}{L_B}\right]} \left[\Delta n_B(x_{pE}) \cdot \sinh\left(\frac{W_b - x}{L_B}\right) + \Delta n_B(W_b) \cdot \sinh\left(\frac{x - x_{pE}}{L_B}\right) \right] \quad (2)$$

여기서 Base 영역 내의 전자의 확산 거리 $L_B = \sqrt{D_B \tau_B}$ 이며, 적용한 경계 조건은 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} B.C.: \quad & i) \quad \delta n_B(x = x_{pE}) = \Delta n_B(x_{pE}) \\ & ii) \quad \delta n_B(x = W_b) = \Delta n_B(W_b) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, $\Delta n_B(x_{pE})$ 와 $\Delta n_B(W_b)$ 는 N-P 이종접합 구조의 특성 모델로부터 다음과 같이 나타내어진다.^[9]

$$\Delta n_B(x_{pE}) = S_{nE} \cdot n_{B0} \left[e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right] \quad (4-1)$$

$$\Delta n_B(W_b) = S_{nC} \cdot n_{B0} \left[e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right] \quad (4-2)$$

여기서 S_{nE} 와 S_{nC} 는 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$S_{nE} = \frac{1 + \frac{P_{E0}}{n_{E0}} e^{qV_{BE}/kT}}{1 - e^{\frac{2q(V_{BE} - V_{sat}) - \Delta E_{pE}}{kT}}} \quad (5-1)$$

$$S_{nC} = \frac{1 + \frac{P_{C0}}{n_{C0}} e^{qV_{BC}/kT}}{1 - e^{\frac{2q(V_{BC} - V_{sat}) - \Delta E_{pC}}{kT}}} \quad (5-2)$$

한편, 전자에 대한 전류 밀도 방정식은 다음 식 (6)으로 나타내어진다.

$$J_{En}(x) = qD_B \frac{d\delta n_B(x)}{dx} \quad (6)$$

따라서 Emitter 접합의 Base 쪽 공핍층의 끝 $x = x_{pE}$ 에서의 과잉 전자 농도의 기울기는 식 (2)를 미분함으로써 구해지며, 이를 식 (6)에 대입하면, Emitter 전류의 전자 전류 성분 I_{En} 은 다음과 같이 유도된다.

$$I_{En} = AJ_{En}(x_{pE}) = -qA \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \left[\coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) - \operatorname{csc} h \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

(2) 호일 전류 성분 I_{Ep}

정상 상태에서 Emitter 전류 I_E 의 호일 전류 성분 I_{Ep} 를 구하기 위해 Emitter 접합에서 호일에 대한 확산 방정식 (8)을 풀면 Emitter 영역 내의 위치 x 에 따른 과잉 호일의 분포 $\delta p_E(x)$ 는 다음 식 (9)와 같이 구해진다.

$$D_E \frac{d^2 \delta p_E(x)}{dx^2} - \frac{\delta p_E(x)}{\tau_E} = 0 \quad \text{단, } -W_e \leq x \leq -x_{nE} \quad (8)$$

$$\delta p_E(x) = \Delta p_E(-x_{nE}) \cdot \frac{\sinh \left(\frac{W_e + x}{L_B} \right)}{\sinh \left(\frac{W_e}{L_B} \right)} \quad (9)$$

여기서 Emitter 영역 내의 호일의 확산 거리 $L_E = \sqrt{D_E \tau_E}$ 이며, 적용한 경계 조건은 다음 식 (10)과 같다.

$$B.C.: \text{ i) } \delta p_E(x = -W_e) = 0 \quad \text{ii) } \delta p_E(x = -x_{nE}) = \Delta p_E(-x_{nE}) \quad (10)$$

이때, $\Delta p_E(-x_{nE})$ 는 N-P 이종접합 구조의 특성 모델로부터 다음과 같이 나타내어진다^[9].

$$\Delta p_E(-x_{nE}) = S_{pE} \cdot p_{E0} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \quad (11)$$

여기서 S_{pE} 는 다음과 같이 정의 하였다.

$$S_{pE} = \frac{1 + \frac{n_{B0}}{P_{B0}} e^{qV_{BE}/kT}}{1 - e^{\{2q(V_{BE} - V_{n0E}) - \Delta E_{pE}\}/kT}} \quad (12)$$

한편, 호일에 대한 전류 밀도 방정식은 다음 식 (13)으로 나타내어진다.

$$J_{Ep}(x) = -qD_E \frac{d\delta p_E(x)}{dx} \quad (13)$$

따라서 Emitter 접합의 Emitter 쪽 공핍층의 끝 $x = -x_{nE}$ 에서의 과잉 호일 농도의 기울기는 식(9)를 미분함으로써 구해지며, 이를 식(13)에 대입하면, Emitter 전류의 호일 전류 성분 I_{Ep} 는 다음과 같이 유도된다.

$$I_{Ep} = AJ_{Ep}(-x_{nE}) = -qA \left(\frac{D_E}{L_E} \right) p_{E0} \cdot \coth \left(\frac{W_e}{L_E} \right) \cdot S_{pE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \quad (14)$$

이 식 (7)과 (14)로부터, 정상 상태에서 Emitter 전류 I_E 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} + I_{RG}^E = -qA \left\{ \left[\left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} + \left(\frac{D_E}{L_E} \right) p_{E0} \cdot \coth \left(\frac{W_e}{L_E} \right) \cdot S_{pE} \right] \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) - \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \operatorname{csc} h \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) + I_{RG}^E \right\} \quad (15)$$

이때, Emitter 접합의 공핍층 내의 생성-재결합 전류 I_{RG}^E 는 N-P 이종접합 구조의 생성-재결합 전류 특성 모델로부터 쉽게 계산해낼 수 있다.^[9]

2) Collector 전류

HBT의 Collector 전류 I_C 는 Base에서 Collector로 주입되는 전자에 의한 전류 성분 I_{Cn} 과 Collector에서 Base로 주입되는 호일에 의한 전류 성분 I_{Cp} 및 Collector 접합의 공핍층 내의 생성-재결합 전류 성분 I_{RG}^C 의 합으로 구성된다. 이때 전자 전류 성분 I_{Cn} 과 호일 전류 성분 I_{Cp} 는 Collector 접합에서 확산 방정식을 풀어 구할 수 있다.

(1) 전자 전류 성분 I_{Cn}

정상 상태에서 Collector 전류 I_C 의 전자 전류 성분 I_{Cn} 을 구하기 위해 Collector 접합에서 전자에 대한 확산 방정식 (16)을 풀면, Base 영역 내의 위치 x' 에 따른 과잉 전자의 분포 $n_B(x')$ 은 다음 식 (17)과 같이 구해진다.

$$D_B \frac{d^2 \delta n_B(x')}{dx'^2} - \frac{\delta n_B(x')}{\tau_B} = 0 \quad \text{단, } X_{n'} \leq x' \leq W'_b \quad (16)$$

$$\delta n_B(x') = \frac{1}{\sinh \left(\frac{W'_b - X_{n'}}{L_B} \right)} \left[\Delta n_B(X_{n'}) \cdot \sinh \left(\frac{W'_b - x'}{L_B} \right) + \Delta n_B(W'_b) \cdot \sinh \left(\frac{x' - X_{n'}}{L_B} \right) \right] \quad (17)$$

여기서 적용한 경계 조건은 다음 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} B.C.: \text{ i) } \delta n_B(x' = x'_{PC}) &= \Delta n_B(x'_{PC}) \\ \text{ii) } \delta n_B(x' = W'_b) &= \Delta n_B(W'_b) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} B.C.: \text{ i) } \delta p_C(x' = -W'_c) &= 0 \\ \text{ii) } \delta p_C(x' = -x'_{nC}) &= \Delta p_C(-x'_{nC}) \end{aligned} \quad (24)$$

이때, $\Delta n_B(x'_c)$ 과 $\Delta n_B(W'_b)$ 은 N-P 이종 접합 구조의 특성 모델로 부터 다음과 같이 나타내어진다.⁹⁾

$$\Delta n_B(x'_{PC}) = S_{nc} \cdot n_{B0} \left(e^{qV_{nc}/kT} - 1 \right) \quad (19-1)$$

$$\Delta n_B(W'_b) = S_{nE} \cdot n_{B0} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \quad (19-2)$$

한편, 전자에 대한 전류 밀도 방정식은 다음 식 (20)으로 나타내어진다.

$$J_{Cn}(x') = qD_B \frac{d\delta n_B(x')}{dx'} \quad (20)$$

따라서 Collector 접합의 Base 쪽 공핍층의 끝 $x' = x'_{PC}$ 에서의 과잉 전자 농도의 기울기는 식 (17)을 미분함으로써 구해지며, 이를 식 (20)에 대입하면, Collector 전류의 전자 전류 성분 I_{Cn} 은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} I_{Cn} &= -AJ_{Cn}(x'_{PC}) \\ &= qA \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \left[\coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nc} \cdot \left(e^{qV_{nc}/kT} - 1 \right) \right. \\ &\quad \left. - \csc h \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

(2) 호을 전류 성분 I_{Cp}

정상 상태에서 Collector 전류 I_C 의 호을 전류 성분 I_{Cp} 를 구하기 위해 Collector 접합에서 호을에 대한 확산 방정식 (22)를 풀면 Collector 영역 내의 위치 x 에 따른 과잉 호을의 분포 $\delta p_C(x)$ 는 다음 식 (23)과 같이 구해진다.

$$D_C \frac{d^2 \delta p_C(x')}{dx'^2} - \frac{\delta p_C(x')}{\tau_E} = 0 \quad \text{단, } x'_c \leq x' \leq -W_C \quad (22)$$

$$\delta p_C(x') = \Delta p_C(-x'_{nC}) \cdot \frac{\sinh \left(\frac{W'_c + x'}{L_C} \right)}{\sinh \left(\frac{W'_c}{L_C} \right)} \quad (23)$$

여기서 Collector 영역 내의 호을의 확산 거리 $LC = \sqrt{D_C \tau_C}$ 이며, 적용한 경계 조건은 다음 식 (24)와 같다.

이때, $\Delta p_C(-x'_{nC})$ 는 N-P 이종 접합 구조의 특성 모델로 부터 다음과 같이 나타내어진다.⁹⁾

$$\Delta p_C(-x'_{nC}) = S_{pc} \cdot p_{C0} \left(e^{qV_{nc}/kT} - 1 \right) \quad (25)$$

한편, 호을에 대한 전류 밀도 방정식은 다음 식 (26)으로 나타내어진다.

$$J_{Cp}(x') = -qD_C \frac{d\delta p_C(x')}{dx'} \quad (26)$$

따라서 Collector 접합의 Collector 쪽 공핍층의 끝 $x' = x'_{nC}$ 에서의 과잉 호을 농도의 기울기는 식 (23)을 미분함으로써 구해지며, 이를 식 (26)에 대입하면, Collector 전류의 호을 전류 성분 I_{Cp} 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} I_{Cp} &= -AJ_{Cp}(-x'_{nC}) \\ &= qA \left(\frac{D_C}{L_C} \right) p_{C0} \cdot \coth \left(\frac{W'_c}{L_C} \right) \cdot S_{pc} \cdot \left(e^{qV_{nc}/kT} - 1 \right) \end{aligned} \quad (27)$$

이 식 (21)과 (27)로 부터, 정상 상태에서 Collector 전류 I_C 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} I_C &= I_{Cn} + I_{Cp} + I'_{RC} \\ &= -qA \left[\left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \csc h \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} \cdot \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nc} + \left(\frac{D_C}{L_C} \right) p_{C0} \cdot \coth \left(\frac{W'_c}{L_C} \right) \cdot S_{pc} \right\} \cdot \left(e^{qV_{nc}/kT} - 1 \right) \right] \\ &\quad + I'_{RC} \end{aligned} \quad (28)$$

이때, Collector 접합의 공핍층 내의 생성-재결합 전류 I'_{RC} 는 N-P 이종 접합 구조의 생성-재결합 전류 특성 모델로 부터 쉽게 계산해낼 수 있다.⁹⁾

Ⅱ. 1.3. Base 전류

HBT의 Base 전류 I_B 는 Emitter 전류 I_E 와 Collector 전류 I_C 의 차에 의해 쉽게 구해진다. 앞에서 구한 Emitter 전류 관계식 (15)와 Collector 전류 관계식 (28)로 부터 Base 전류 I_B 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 I_B &= I_E - I_C \\
 &= -qA \left[\left(\frac{D_E}{L_E} \right) p_{E0} \cdot \coth \left(\frac{W_E}{L_E} \right) \cdot S_{pE} \right. \\
 &\quad + \left. \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \left\{ \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) - \operatorname{csch} \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \right\} \cdot S_{nE} \right] \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \\
 &\quad + \left[\left(\frac{D_C}{L_C} \right) p_{C0} \cdot \coth \left(\frac{W_C}{L_C} \right) \cdot S_{pC} \right. \\
 &\quad + \left. \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \left\{ \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) - \operatorname{csch} \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \right\} \cdot S_{nC} \right] \\
 &\quad + \left(I_{RG}^E - I_{RG}^C \right) \tag{29}
 \end{aligned}$$

2. Base 재결합 전류 I_{BR}

HBT의 Base 영역 내의 재결합 전류 I_{BR} 은 Base 영역 내에 축적된 과잉 전자 의 농도 $\delta_{nb}(x)$ 로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 I_{BR} &= \frac{\Delta Q_B}{\tau_B} \\
 &= -\frac{qA}{\tau_B} \int_{x_{pE}}^{x_{nE}} \delta_{nb}(x) dx = -qA \left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \left\{ \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) - \operatorname{csch} \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \right\} \\
 &\quad \cdot \left[S_{nE} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) + S_{nC} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) \right] \tag{30}
 \end{aligned}$$

이때 Base 재결합 전류 I_{BR} 은 위에서 구한 Base 전류 I_B 의 관계식(29)에서 우변의 각 항의 두번째 성분의 합과 같음을 알 수 있다.

3. HBT의 Ebers-Moll 모델

앞에서 구한 각 단자전류 관계식 (15)와 (28)로부터 HBT의 Ebers-Moll 방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$I_E = I_{ES} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) + I_{RG}^E \tag{31-1}$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) + I_{RG}^C \tag{31-2}$$

$$\begin{aligned}
 I_B &= (1 - \alpha_F) I_{ES} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) + (1 - \alpha_R) I_{CS} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) \\
 &\quad + \left(I_{RG}^E - I_{RG}^C \right) \tag{31-3}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$I_{ES} = -qA \left[\left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nE} + \left(\frac{D_E}{L_E} \right) p_{E0} \cdot \coth \left(\frac{W_E}{L_E} \right) \cdot S_{pE} \right] \tag{32}$$

$$I_{CS} = -qA \left[\left(\frac{D_B}{L_B} \right) n_{B0} \cdot \coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot S_{nC} + \left(\frac{D_C}{L_C} \right) p_{C0} \cdot \coth \left(\frac{W_C}{L_C} \right) \cdot S_{pC} \right] \tag{33}$$

$$\alpha_F = \left[\cosh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \left\{ 1 + \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{L_B}{L_E} \cdot \frac{p_{E0}}{n_{B0}} \cdot \coth \left(\frac{W_E}{L_E} \right) \tanh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot \frac{S_{pE}}{S_{nE}} \right\} \right]^{-1} \tag{34}$$

$$\alpha_R = \left[\cosh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \left\{ 1 + \frac{D_C}{D_B} \cdot \frac{L_B}{L_C} \cdot \frac{p_{C0}}{n_{B0}} \cdot \coth \left(\frac{W_C}{L_C} \right) \tanh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \cdot \frac{S_{pC}}{S_{nC}} \right\} \right]^{-1} \tag{35}$$

이다. 이때 만약, $W_B \ll L_B$ 이면 $\coth \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \approx 1$, $\tanh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \approx \left(\frac{W_B}{L_B} \right)$ 로 근사화된다. 따라서 이러한 경우에는 α_F 와 α_R 는 다음과 같이 근사화 된다.

$$\alpha_F \approx \left[1 + \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{L_B}{L_E} \cdot \frac{p_{E0}}{n_{B0}} \cdot \frac{S_{pE}}{S_{nE}} \right]^{-1} \tag{36}$$

$$\alpha_R \approx \left[1 + \frac{D_C}{D_B} \cdot \frac{L_B}{L_C} \cdot \frac{p_{C0}}{n_{B0}} \cdot \frac{S_{pC}}{S_{nC}} \right]^{-1} \tag{37}$$

한편, 식 (31-1)에 α_F 를 곱하여 식 (31-2)에서 빼면,

$$I_C = \alpha_F I_E - (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) + \left(I_{RG}^C - \alpha_F I_{RG}^E \right) \tag{38-1}$$

이 유도되며, 같은 방법으로

$$I_E = \alpha_R I_C + (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{ES} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) + \left(I_{RG}^E - \alpha_R I_{RG}^C \right) \tag{38-2}$$

가 유도된다. 이때, $(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS}$ 를 I_{C0} 로, $(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{ES}$ 를 I_{E0} 로 두면, 각 접합의 공핍층 내의 생성 - 재결합 전류를 무시하면, I_{C0} 는 Emitter 접합을 개방 (open : $I_E = 0$)하였을 때의 Collector 역방향 포화 전류이며, I_{E0} 는 Collector 접합을 개방 (open : $I_C = 0$)하였을 때의 Emitter 역방향 포화 전류이다. 이 경우, Ebers-Moll 방정식은 다음 식 (39-1)과 (39-2)로 나타내어지며, HBT의 Ebers-Moll 등가 회로는 다음 그림 2와 같이 나타내어진다.

$$I_E = \alpha_R I_C + I_{E0} \left(e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \tag{39-1}$$

$$I_C = \alpha_F I_E + I_{C0} \left(e^{qV_{BC}/kT} - 1 \right) \tag{39-2}$$

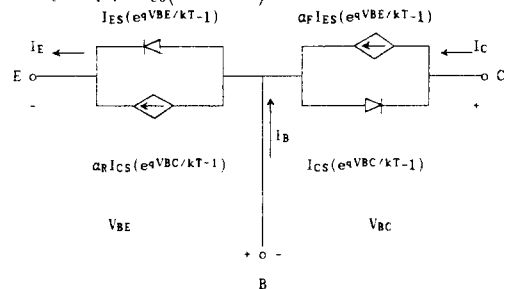


그림 2. HBT의 Ebers-Moll 등가 회로
Fig. 2. Ebers-Moll equivalent circuit for HBT.

4. 실험 데이터와의 비교

본 모델의 타당성을 입증하기 위하여, 2개의 Sample에 대하여 simulation한 결과를 실험 데이터와 비교한 결과를 다음 그림 3과 4에 각각 나타내었으며, 사용된 파라미터 값은 표 1에 나타내었다.

그림 3과 4에 나타낸 계산 결과는 고려된 전압 범위에서 실험 데이터와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 인가 전압이 높은 값에서는 약간의 오차를 보이는데, 이는 bulk resistance 효과를 고려하지 않았기 때문에 발생한 것이며, 또한 고려된 전체 전압 범위에서 나타나는 오차는 본 모델에서 Emitter grading을 포함시키지 않았기 때문에 abrupt junction을 가정하여 simulation한 데 따른 것이다. 따라서 graded junction에 대한 모델을 포함하고, bulk resistance 효과를 고려하면 이와 같은 오차는 매우 줄어들 것으로 생각된다.

표 1. 파라미터 값

Table 1. Parameter values.

	Layer Thickness(Å)	Doping(cm ⁻³)	Al mole fraction	
s				
a	Emitter	n-AlGaAs 1200	5 × 10 ¹⁷	0.3
a	Emitter Grading	300	5 × 10 ¹⁷	0 ~ 0.3
p	Base	p ⁺ -GaAs 1400	1 × 10 ¹⁹	
l	Collector	n ⁺ -GaAs 7000	7.5 × 10 ¹⁹	
e				
l	Emitter Area : 3 × 10 μm ²			
s				
a	Emitter	n-AlGaAs 1000	5 × 10 ¹⁷	0.3
a	Spacer	GaAs Δ	undoped	
p	Base	p ⁺ -GaAs 1000-Δ	1 × 10 ¹⁹	
l	Collector	n-GaAs 3000	1 × 10 ¹⁷	
e				
l	Emitter Area : 48 × 48 μm ²			

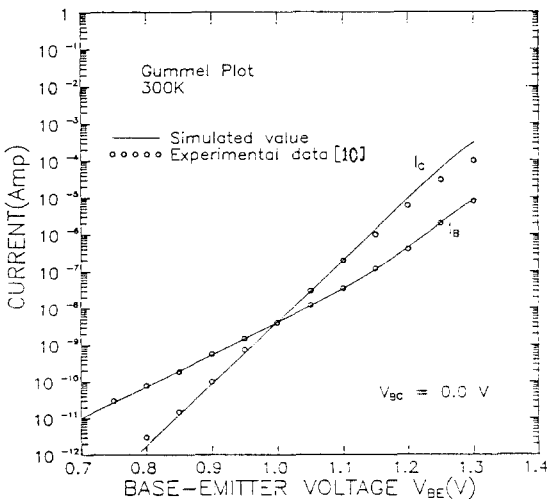


그림 3. 샘플 1에 대한 Gummel Plot

— : 본 모델로 구한 결과

o o o : 실험 데이터 [10]

Fig. 3. Gummel Plot for sample 1

— : Result of our model

o o o : Experimental data [10].

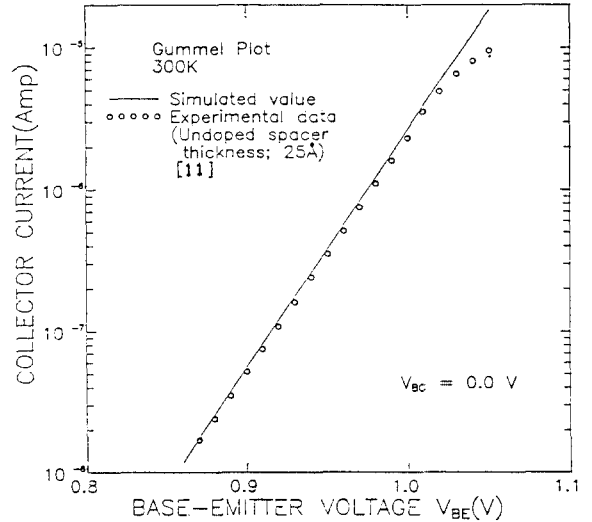


그림 4. 샘플 2에 대한 Gummel Plot

— : 본 모델로 구한 결과

o o o : 실험 데이터 [11]

Fig. 4. Gummel Plot for sample 2

— : Result of our model

o o o : Experimental data [11].

III. 결론

본 논문에서는 HBT의 간단한 Ebers-Moll 모델을 제시하였다. 이를 위해 HBT의 기본구조인 N-P 이종접합 구조의 특성 모델을 HBT에 적용하여 HBT의 특성을 해석하고, 구해진 단자 전류로부터 HBT의 Ebers-Moll 방정식을 유도하였다. 또한 이종접합 구조에 대한 물리적 파라미터를 동종 접합 구조의 파라미터로 대체함으로써 동종 접합 구조의 모델로도 사용할 수 있게 하였기 때문에, 단일 및 이종이종접합 구조를 갖는 HBT의 특성 해석에 모두 사용할 수 있게 하였으며, 모델 파라미터들이 소자 파라미터에 직접 연관되게 함으로써 HBT의 특성을 최적화하는데 사용될 수 있게 하였다.

또한 모델이 간단하고 이해하기 쉬우며 해석적으로, 계산 시간이 수치 해석에 비해 훨씬 짧다는 장점들로 인해 SPICE와 같은 소자 설계 및 회로 sim-

ulation 용 S/W에 쉽게 응용할 수 있으리라 생각된다. 본 모델들을 사용하여 simulation한 결과는 실험 데이터와 비교적 잘 일치하였다.

參考文獻

- [1] H. Morkoc and P.M. Solomon, "The HEMT: A superfast transistors," *IEEE Spectrum*, vol. 21, no. 2, pp.28-35, 1984.
- [2] H. Kroemer, "Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 1, pp.13-25, 1982.
- [3] F. Ali, I. Bahl, and A. Gupta, *Microwave and Millimeter-wave Heterostructure Transistors and Their applications*: Artech House, 1989.
- [4] H. Morkoc and M. Abe, 'Special Issue on Heterojunction FET's,' *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-33, no. 5, 1986.
- [5] S. Tiwari, S.L. Wright, and A.W. Kleinsasser, "Transport and related properties of (Ga,Al)As/GaAs double heterostructure bipolar junction transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-34, no. 2, pp.185-198, 1987.
- [6] N. Moll, S. Tiwari, and N. Yokoyama, 'Special Issue on Heterostructure Transistors,' *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-36, no. 10, 1989.
- [7] M.S. Lundstrom, "An Ebers-Moll Model for the Heterostructure Bipolar Transistor," *Solid-State Electronics*, vol. 29, no. 11, pp.1173-1179, 1986.
- [8] J. J. Ebers and J. L. Moll, "Large-signal behavior of Junction Transistors," *Proceedings of IRE*, vol. 42, pp.1761-1772, 1954.
- [9] 박광민, 최재홍, 광계달, "HBT 응용을 위한 N-P 동종 및 이종접합 구조의 통합 해석적 모델," 전자공학회논문지, 제29권 A편, 제6호, pp.6-13, 1992.
- [10] M.E.Hafizi, C.R.Crowell, and M. E. Grupen, "The DC Characteristics of GaAs/AlGaAs Heterojunction Bipolar Transistors with Application to Device Modeling," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-37, no.10, pp 2121-2129, 1990.
- [11] H.Ito, "Generation-Recombination Current in the Emitter-Base Junction of AlGaAs/GaAs HBTs," *Japanese J. Appl. Phys.*, vol. 25, no.9, pp.1400-1404, 1986.

著者紹介

朴 光 旻(正會員) 第29卷 A篇 第6號 參照
 현재 순천향대학교 공과대학 전자
 공학과 조교수, 순천향대학교 전
 자기술연구소 소장.

郭 桂 達(正會員) 第29卷 A篇 第6號 參照
 현재 한양대학교 공과대학 전자
 공학과 교수, 한양대학교 첨단
 반도체 연구센터 소장.