

BJT Gummel-Poon 모델 파라미터 추출 방법

윤 신 섭, 이 성 현

한국의국어대학교 전자정보공학과 전자공학전공

전화: 031-330-4582 / 팩스: 031-330-4120

A Parameter Extraction Method for BJT Gummel-Poon Model

Shinshub Youn and Seonghearn Lee

Department of Electronic Engineering, Hankuk University of Foreign Studies, Korea

E-mail: luckyss@empal.com

Abstract

A direct parameter extraction method using several two-port parameter equations derived in cutoff and active bias modes has been studied to obtain an accurate Gummel-Poon BJT model. First, dc model parameters were extracted from slopes and y-axis intercepts of I-V curve and Gummel plot. The pad capacitances and junction capacitance parameters were determined by using measured S-parameter sets in the cutoff bias. The resistance and transit time parameters were extracted by using measured S-parameter sets in the active bias.

I. 서론

최근 우리나라를 비롯한 전 세계적으로 무선 통신용 송수신기의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 BJT(Bipolar Junction Transistor)를 사용한 RF IC(Radio-Frequency Integrated Circuit)의 중요성이 강조되고 있다. 이러한 RF IC의 최적설계를 위해서는 정확하고 신뢰도 있는 SPICE 모델의 확보가 필수적이며, BJT 모델로 널리 사용되고 있는 Gummel-Poon (G-P)모델 파라미터 추출이 매우 중요하다 [1]. 기존의 파라미터 추출방법으로는 여러 bias에서 측정된 S-parameter 데이터 set과 모델로 계산된 S-parameter가 측정된 주파수범위 내에서 가능한 한 가깝게 일치하도록 복잡한 CAD optimization을 수행하였다 [2]. 그러나 이 방법은 초기 값에 크게 의존하며, 모델에서 미지변수의 수가 많기

때문에 optimization 동안에 추출된 변수 값들이 비물리적이고 오차가 생길 가능성이 크다 [2], [3].

따라서, 본 논문에서는 이러한 오차를 줄이고 정확한 Gummel-Poon BJT 모델을 확보하기 위해, 측정된 S-parameter로부터 직접 모델 변수들을 추출하는 개선된 방법을 연구하였다.

II. 모델 파라미터 추출방법

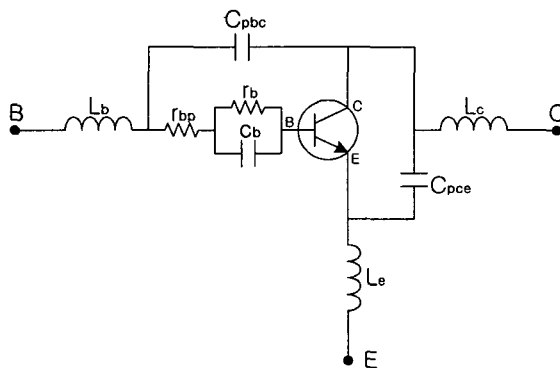


그림 1. 수정된 Gummel-Poon BJT 모델

본 연구에서 사용된 소자는 $36 \times 8 \times 2.4 \mu\text{m}$ 의 multifinger 에미터를 가진 polysilicon emitter BJT이다. 그림 1은 pad (C_{pbc} , C_{pce}) 및 금속배선(L_b , L_c , L_e) 성분들이 포함된 수정된 Gummel-Poon BJT 모델을 보여준다.

이 회로에서 C_{pbc} 는 베이스-컬렉터 pad capacitance, C_{pce} 는 컬렉터-에미터 pad capacitance 이고, r_{bp} 는 베이스 외

부저항이다. 또한 lateral 분포 효과를 고려하기 위하여 G-P 모델 파라미터인 RB 를 0 으로 setting 하고, 외부에 내부 베이스 저항(r_b)과 베이스 캐패시턴스(C_b)를 첨가하였다 [4].

먼저, dc 모델변수들은 Gummel plot 과 I-V 특성 curve 의 기울기와 y 축 절편들로부터 구한 후에, 이 값을 초기치로 하여 측정곡선에 가장 잘 일치하도록 모델 파라미터들을 fitting 함으로써 얻어졌다. 그림 2 는 측정된 Gummel plot 과 모델 곡선과의 비교 그래프로서 넓은 전류영역에서 아주 잘 일치함을 보여준다.

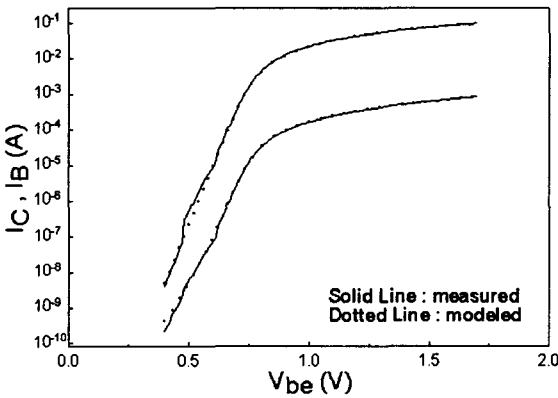


그림 2. 모델된 Gummel Plot 과 측정곡선의 비교

그리고, 여분의 “open” 테스트 패턴 [2] 없이 pad capacitance 및 capacitance 모델 parameter 들을 추출하기 위해 cutoff bias 영역에서 측정된 S-parameter 데이터 set 을 사용하였다 [5]. 이 때, 차단영역의 소신호 등가회로로부터 유도된 다음 방정식들이 이용되었다.

$$C_{bct} = C_{pbc} + CJC(1 - V_{bc}/VJC)^{-MJC} \approx -\frac{1}{\omega} \text{Imag}(Y_{12}) \quad (1)$$

$$C_{cet} = C_{pce} + CJS(1 - V_{ce}/VJS)^{-MJS} \approx \frac{1}{\omega} \text{Imag}(Y_{22} + Y_{12}) \quad (2)$$

여기에서 C_{bct} 는 차단 영역에서 베이스와 컬렉터 사이의 총 capacitance 이며, C_{cet} 는 컬렉터와 에미터 사이의 총 capacitance 이다. 또한, CJC, CJE 들은 V_{bc} , V_{ce} 가 각각 0V 로 바이어스 되었을 때의 측정값이고, VJC, VJE 들은 built-in 장벽 전압이며, MJC, MJE 들은 접합에서의 도핑 profile 에 의한 캐패시턴스 gradient 요소들이다. 그리고,

이때 사용된 Y-parameter 는 측정된 S-parameter 로부터 변환되었다.

C_{bct} 와 C_{cet} 로부터 C_{pbc} 와 C_{pce} 를 분리 추출하기 위해서 식 (1)과 (2)의 전압 종속 특성을 이용하였다. 즉, 그림 3 에서 보여주듯이 bias 를 변화시키면서 측정된 $(-1/\omega) \text{Imag}(Y_{12})$ 를 $(VJC - V_{bc})^{-MJC}$ 의 함수로 그린 후에 얻어진 y-절편 값으로 C_{pbc} 를 추출하였다. 인덕턴스들은 독립적으로 구할 수 없기 때문에 5.05GHz 까지의 추출 주파수 영역에서 1 차적으로 무시하였다.

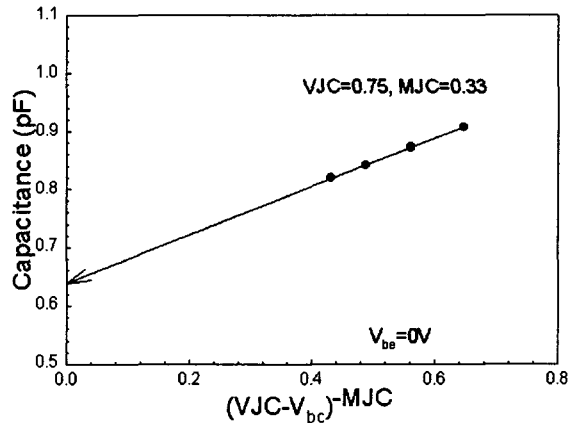


그림 3. 측정된 $(-1/\omega) \text{Imag}(Y_{12})$ 을 $(VJC - V_{bc})^{-MJC}$ 함수로 그린 그래프 (Cutoff bias).

컬렉터 저항을 제외한 BJT 모델 파라미터들은 활성 영역(active region)으로 bias 한 후에 측정된 S-parameter 데이터를 사용하여 다음과 같이 추출하였다.

BJT 소신호 등가회로로부터 r_{bp} 는 고주파 영역에서 다음과 같은 방정식으로 근사화 된다 [2].

$$r_{bp} \approx \text{Real}(Z^{a11} - Z^{a12}) \quad (3)$$

이 때, Z^a -parameter 는 Y-parameter 로부터 C_{pbc} 와 C_{pce} 를 뺀 Y^a -parameter 로부터 변환되었다.

RE 는 저주파 영역에서 다음 식으로 근사화 된다 [2].

$$RE \approx \text{Real}(Z^{a11}) - \frac{V_T}{I_C} \quad (4)$$

여기에서 V_T 는 KT/q 로 정의된다.

하지만, RC 는 차단 영역 bias 에서 측정된 다음과 같은 방정식을 사용하여 추출하였다.

$$RC = \text{Real}(Z^{a22} - Z^{a21}) \quad (5)$$

이 때 $\text{Real}(Z_{11} - Z_{12})$, $\text{Real}(Z_{12} - V_T/I_C)$ 의 측정된 주파수 응답 데이터를 그림 4에서 보여주고 있다.

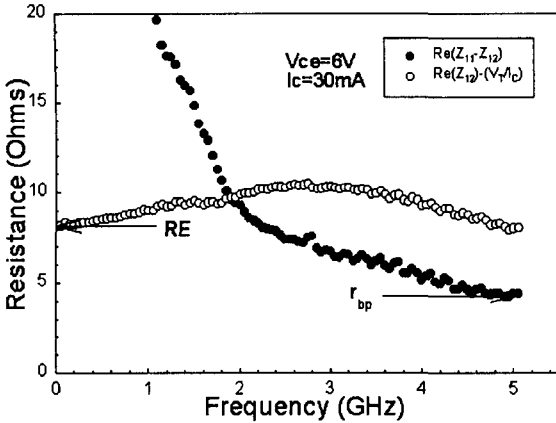


그림 4. 저항추출을 위한 주파수 응답 데이터.

그리고, C_b 와 r_b 를 구하기 위해 BJT 소신호 등가회로로부터 다음 방정식을 유도하였다 [5].

$$C_b = \frac{1}{\omega} \text{Imag} \left(\frac{1}{Z_{11}^a - Z_{12}^a - r_{bp}} \right) \quad (6)$$

$$r_b = \frac{1}{\text{Real} \left(\frac{1}{Z_{11}^a - Z_{12}^a - r_{bp}} \right)} \quad (7)$$

G-P 모델의 천이시간 모델 파라미터들은 다음 식으로 정의된다 [1].

$$\text{TFF} = \text{TF} \left[1 + \text{XTF} \left(\frac{I_C}{I_C + \text{ITF}} \right)^2 e^{\left(\frac{V_{bc}}{1.44 \text{VTF}} \right)} \right] \quad (8)$$

순방향천이시간(TFF)은 전류를 변화시키면서 측정된 S-parameter set 을 사용하여 추출되었으며, BJT 소신호 등가회로로부터 유도된 다음 방정식을 사용하였다 [6].

$$\frac{C_\pi}{g_{mo}} = \frac{C_{bc}}{g_{mo}} + \text{TFF} = \frac{1}{\omega} \text{Imag} \left[\frac{Z_{22}^a - Z_{12}^a - RC}{Z_{12}^a - Z_{21}^a} \right] \quad (9)$$

여기에서, C_π 는 베이스-에미터 접합 capacitance (C_{bc})와 확산 capacitance 의 합이다. 먼저 낮은 전류영역에서의 TFF 값인 TF 는 식 (9)를 $1/I_C$ 의 함수로 그린 그림 5 에서 보여주듯이 낮은 전류 데이터를 fitting 하여 구한 직선의 y-절편으로부터 추출하였다. 그리고, 여기서 fitting 한 기울기를 가진 직선(C_{bc}/g_m)과 원래 데이터(C_π/g_m)의 차로 TFF 를 구하였다.

이 TFF 를 그림 6 과 같이 $\ln(I_C)$ 의 함수로 그리고, TFF 가 급격히 증가되는 corner 전류를 그림과 같이 구함

으로써 ITF 를 추출하였다. XTF 는 $V_{bc}=0$ 인 bias 에서 추출된 TFF 값과 앞에서 구한 TF 와 ITF 를 식 (8)에 대입하여 구하였다. VTF 은 V_{bc} 가 서로 다른 bias 에서 추출된 TFF 들과 위에서 구한 TF, XTF, ITF 값들을 식 (8)에 대입하여 구한 값들의 평균하여 추출하였다.

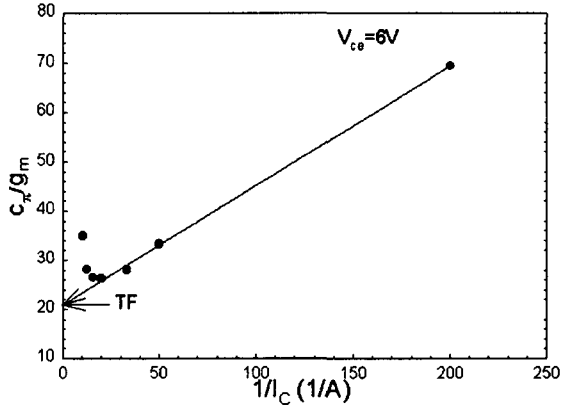


그림 5. 추출된 C_π/g_m 을 $1/I_C$ 함수로 그린 그래프.

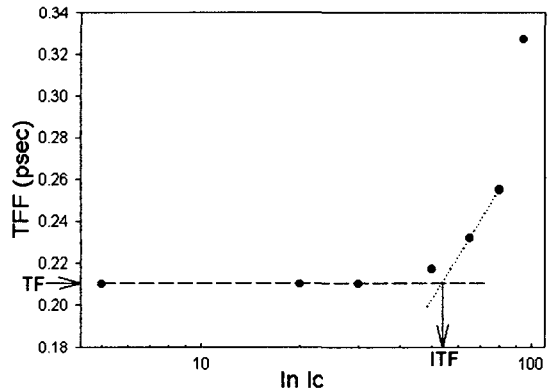


그림 6. $\ln(I_C)$ 의 함수로 그려진 TFF 추출데이터.

PTF 는 $g_m = g_{mo} e^{(j\omega t_d)}$ 의 지연시간 (t_d)를 사용한 다음 식을 사용하여 그림 7 과 같이 추출되었다.

$$\text{PTF} = \frac{360t_d}{2\pi \text{TFF}} \quad (10)$$

여기에서, t_d 는 BJT 소신호 등가회로의 Z^a -parameter 를 사용한 다음 식으로부터 추출되었다 [7].

$$e^{-j\omega t_d} = \left(\frac{g_\pi}{g_{mo}} + \frac{j\omega C_\pi}{g_{mo}} \right) \frac{Z_{12}^a - Z_{21}^a}{Z_{22}^a - Z_{12}^a - RC} \quad (11)$$

이때 g_π/g_{mo} 와 C_π/g_{mo} 는 식 (11)의 낮은 주파수에서 $e^{j\omega t_d} \approx 1$ 로 가정하고 유도된 다음 식으로부터 추출된다.

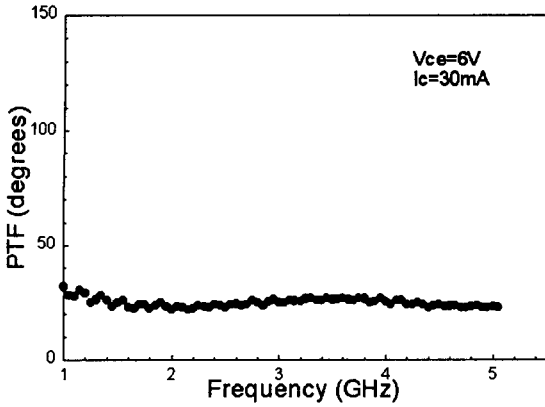


그림 7. 추출된 PTF의 주파수 응답 데이터.

$$\frac{g_{\pi}}{g_{mo}} + \frac{j\omega C_{\pi}}{g_{mo}} = \frac{Z^{a_{22}} - Z^{a_{12}} - RC}{Z^{a_{12}} - Z^{a_{21}}} \quad (12)$$

인덕턴스 값들은 지금까지 추출된 G-P 모델 파라미터들을 고정시킨 후, 모델된 S-parameter 가 측정데이터와 일치되도록 조정하여 결정되었다. 이와 같이 추출된 G-P 모델의 시뮬레이션된 전류이득 ($|h_{21}|$)과 전력이득 (MSG/MAG)은 그림 8 에서 보는 것처럼 측정된 데이터들과 0.05 에서 5.05GHz 까지 좋은 일치를 보였으며, 이는 추출방법의 정확함을 보여준다. 이와 같이 개발된 Gummel-Poon 모델 추출방법을 사용함으로써 정확하고 신뢰도 있는 RF IC의 설계가 가능할 것으로 보인다.

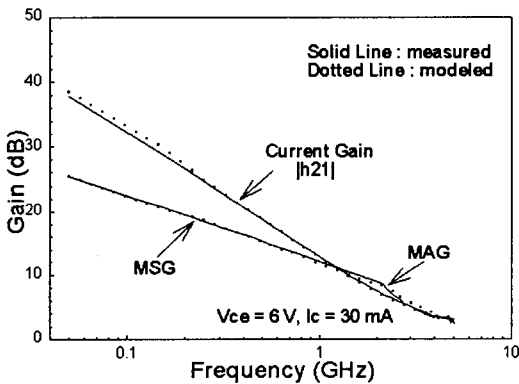


그림 8. 모델된 이득곡선들과 측정데이터
 $|h_{21}|$: Current Gain
 MSG: Maximum Stable power Gain
 MAG: Maximum Available power Gain

III. 결론

본 연구에서는 lateral 베이스 분포 효과를 고려한

Gummel-Poon BJT 모델 파라미터를 정확히 추출할 수 있는 방법을 제시하였다. 먼저, 패드와 접합 capacitance 파라미터들을 추출하기 위하여 cutoff bias 영역에서 측정된 S-parameter set 을 사용되었으며, 저항과 천이시간 파라미터들은 active bias 영역에서 측정된 S-parameter 데이터를 사용하여 추출하였다. 이때 사용된 파라미터 추출 방정식들은 소신호 등가회로부터 유도된 2 단자-파라미터 방정식을 사용하여 유도되었다. 이와 같이 얻어진 모델과 Gain 측정데이터는 차단주파수까지 좋은 일치를 보였으며, 이는 추출방법의 정확도를 입증한다.

◆ 본 연구는 IDEC 의 CAD tool 지원에 의해서 이루어졌음.

References

- [1] P. Antognetti and G. Massobrio, *Semiconductor device modeling with SPICE*, New York, McGraw-Hill, 1991.
- [2] S. Lee, B. R. Ryum, and S. W. Kang, "A new parameter extraction technique for small-signal equivalent circuit of polysilicon emitter bipolar transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.41, no.2, pp.233-238, February 1994.
- [3] 이성현, "SiGe Heterojunction Bipolar Transistor 의 등가모델 파라미터 추출", 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집 제 25 권 제 1 호, 49-52 쪽, 2002 년.
- [4] H.-S. Rhee, S. Lee, and B.R. Kim, "DC and AC current crowding effects model analysis in bipolar junction transistors using a new extraction method", *Solid-State Electronics*, vol. 38, no.1, pp.31-35, 1995.
- [5] 윤신섭, 이성현 "BJT 소신호 등가회로 파라미터 추출 방법 연구", 대한전자공학회 컴퓨터/반도체 소사이어티 추계종합학술대회 논문집 제 25 권 제 2 호, 403-406 쪽, 2002 년.
- [6] S. Lee, "Forward transit time measurement for heterojunction bipolar transistors using simple Z parameter equation," *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 43, no. 11, pp. 2027-2029, 1996.
- [7] S. Lee, B. R. Ryum, O.-J. Kwon, and J.-H. Lee, "Effect of pad and interconnection parasitics on phase delay of transconductance in advanced bipolar transistors," *Electronics Lett.*, vol. 29, no. 20, p. 1779-1798, 1993.