

GaAs/InGaP HBT 소신호 등가회로 모델 파라미터의 새로운 추출방법

이 명 규, 윤 경 식
고려대학교 전자 및 정보공학부
전화 : 041-860-1779 / 핸드폰 : 017-314-2645

A New Extraction Method of GaAs/InGaP HBT Small-Signal Equivalent Circuit Model Parameters

Myoung-Kyu Rhee and Kyung-Sik Yoon
Dept. of Electronics and Information Engineering, Korea University
E-mail : kyusrhee@hard.korea.ac.kr

Abstract

This paper describes a parameter extraction method for HBT(Heterojunction Bipolar Transistor) equivalent circuit model without measurements of special test structures or numerical optimizations. Instead, all equivalent circuit parameters are calculated analytically from small-signal S-parameters measured under different bias conditions. These values being extracted from the cutoff mode can be used to extract intrinsic parameters at the active mode. This method yields a deviation of about 1.3 % between the measured and modeled S-parameters.

I. 서론

III-V족 화합물 반도체 소자인 HBT는 높은 전류구동력, 낮은 1/f 잡음과 빠른 스위칭 속도로 인하여 차세대 초고속 및 초고주파 소자로 각광받고 있다. HBT를 이용한 신뢰성 있는 MMIC를 설계, 개발, 생산하기 위해서는 정확한 모델 제시가 선행되어야 하는데, HBT 소신호 등가회로 모델은 mesa구조로 인해 FET와는 다르게 피드백 커패시턴스 C_{ex} 가 존재하여 HBT

진성(intrinsic) 영역의 파라미터 값을 추출하는 것이 용이하지 못하다. 이에 HBT 소신호 모델 파라미터 추출에는 모델 S-파라미터와 측정 S-파라미터간의 오차가 최소가 되도록 하는 수치적 최적화 방법이 주로 사용되어 왔다. 그렇지만 이러한 방법은 초기값에 따라 추출된 파라미터 값이 유일하지 못하고, 더욱이 물리적으로 의미가 없는 값을 얻을 수도 있다.

본 논문은 2 - 26.5 GHz 범위에서 특별한 테스트 구조나[1] 수치적 최적화방법을 사용하지 않고, Cutoff 모드에서 측정된 S-파라미터로부터 바이어스에 독립적인 성질을 가지고 있는 외인성(extrinsic) 파라미터를 직접 추출한 후 [2], 능동모드에서 측정한 S-파라미터로부터 이미 추출된 외인성 파라미터 값을 De-embedding하여 바이어스에 의존적인 진성 파라미터 값을 추출한다.[3, 4, 5]

II. HBT 파라미터 추출

2.1 외인성 파라미터 추출

Cutoff 모드에서 T형 HBT 등가회로 모델은 그림 1과 같으며[2], 이 Z 매트릭스를 표현하면 식(1)과 같다.

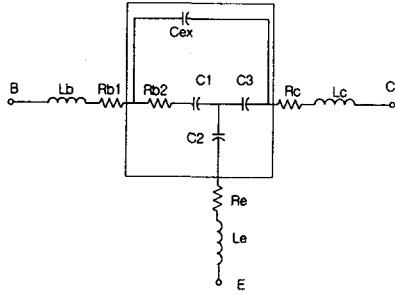


그림 1. Cutoff 모드의 HBT 등가회로

$$Z_{11} = \begin{bmatrix} Z_2 + Z_b + \frac{Z_1(Z_3 + Z_4)}{Z_1 + Z_3 + Z_4} & Z_2 \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3 + Z_4} \\ Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3 + Z_4} & Z_2 + Z_c + \frac{Z_3(Z_4 + Z_1)}{Z_1 + Z_3 + Z_4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$Z_1 = R_{b1} + \frac{1}{j\omega C_1}, \quad Z_2 = R_e + j(\omega L_e - \frac{1}{\omega C_2}),$$

$$Z_3 = -\frac{1}{j\omega C_3}, \quad Z_4 = -\frac{1}{j\omega C_{ex}},$$

$$Z_b = R_{b1} + j\omega L_b, \quad Z_c = R_c + j\omega L_c \text{ 이다.}$$

외인성 저항성분 R_{b1} , R_c , R_e 과 C_2 는 측정 파라미터중 고주파 영역에서 각각 식(2) - (5)에 의해 근사치로 추출할 수 있다. [6]

$$\text{Re}[Z_{t11} - Z_{t21}] = R_{b1} + \frac{R_{t2}(C_{ex} + C_3)}{C_3 C_{ex}^2 ((\omega R_{t2})^2 + C^2)} \quad (2)$$

$$\text{Re}[Z_{t22} - Z_{t12}] = R_c - \frac{R_{t2}}{(\omega^2 C_3 C_{ex})(R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \quad (3)$$

$$\text{Re}[Z_{t12}] = R_e + \frac{R_{t2}(1/C_3 + 1/C_{ex})}{\omega^2 C_3 (R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \quad (4)$$

$$\text{Im}[Z_{t12}] = \omega L_e - \frac{1}{\omega C_2} - \frac{R_{t2}^2 + C/(\omega^2 C_1)}{\omega C_3 (R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \quad (5)$$

$$L_b = \left(\text{Im}[Z_{t11} - Z_{t21}] + \frac{R_{t2}^2 + C/(\omega^2 C_1)}{\omega C_{ex} (R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \right) / \omega \quad (6)$$

$$L_c = \left(\text{Im}[Z_{t22} - Z_{t12}] + \frac{C}{(\omega^2 C_3 C_{ex})(R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \right) / \omega \quad (7)$$

$$L_e = \left(\text{Im}[Z_{t12}] + \frac{1}{\omega C_2} + \frac{R_{t2}^2 + C/(\omega^2 C_1)}{\omega C_3 (R_{t2}^2 + (C/\omega)^2)} \right) / \omega \quad (8)$$

여기서 $C = (1/C_1 + 1/C_3 + 1/C_{ex})$ 이다.

외인성 인덕턴스 L_b , L_c , L_e 를 추출하기 위해서는 먼저 C_1 , C_3 , C_{ex} , R_{b2} 값이 추출되어야 하며, 이를 위해 이미 추출한 외인성 저항값과 C_2 값을 Zt로부터 De-embedding 한다. 그 결과 남은 파라미터를 Y 매트릭스로

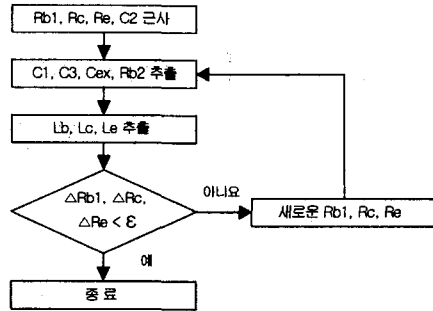


그림 2. Cutoff 모드 파라미터 추출과정

표현할 수 있으며, 식(9) - (12)를 이용하여 C_1 , C_3 , C_{ex} , R_{b2} 값을 추출한다.

$$C_1 = \text{Im}[Y_{11} + Y_{21}]/(2\omega) \quad (9)$$

$$C_3 = \text{Im}[Y_{22} + Y_{12}]/(2\omega) \quad (10)$$

$$C_{ex} = -\text{Im}[Y_{12}]/\omega \quad (11)$$

$$R_{t2} = (K - \sqrt{K^2 - 4(C/\omega)^2})/2 \quad (12)$$

여기서 $K = 1/(\text{Re}[Z_{t12}] - R_e)/(\omega^2 C_3)/(1/C_3 + 1/C_{b2})$ 이다.

외인성 인덕턴스 L_b , L_c , L_e 값은 앞서 추출했던 파라미터 값들을 이용, Zt 매트릭스에서 식(6) - (8)로부터 추출할 수 있다. 그러나 R_{b1} , R_c , R_e , C_2 의 값을 추출할 때 근사 시키는 방법을 사용했기 때문에 보다 정확한 파라미터의 값을 추출하기 위해서는 그림 2에서 보는 바와 같이 R_{b1} , R_c , R_e , C_2 를 제외한 파라미터 값들을 이용하여 다시 외인성 저항성분과 C_2 를 추출해야 하고, 위의 일련의 과정을 R_{b1} , R_c , R_e , C_2 변화가 작을 때까지 반복해야 한다.[6]

2.2 진성 파라미터 추출

그림 2의 하이브리드 T 등가모델의 진성 영역을 Y 매트릭스로 표현하면 식(13) - 식(16)이 도출된다.[3]

$$Y_{11} = Y_{ex} + \frac{Y_{be} + (1 - \alpha)Y_{bc}}{1 + R_{t2}[(1 - \alpha)Y_{be} + Y_{bc}]} \quad (13)$$

$$Y_{12} = -Y_{ex} - \frac{Y_{bc}}{1 + R_{t2}[(1 - \alpha)Y_{be} + Y_{bc}]} \quad (14)$$

$$Y_{21} = -Y_{ex} + \frac{-Y_{bc} + \alpha Y_{be}}{1 + R_{t2}[(1 - \alpha)Y_{be} + Y_{bc}]} \quad (15)$$

$$Y_{22} = Y_{ex} + \frac{Y_{be}(1 + Y_{bc}R_{t2})}{1 + R_{t2}[(1 - \alpha)Y_{be} + Y_{bc}]} \quad (16)$$

여기서 $Y_{ex} = j\omega C_{ex}$, $Y_{bc} = G_{bc} + j\omega C_{bc}$,

$$Y_{be} = G_{be} + j\omega C_{be}, \quad \alpha = \frac{\alpha_0 e^{-j\omega \tau}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_a}} \text{ 이다.}$$

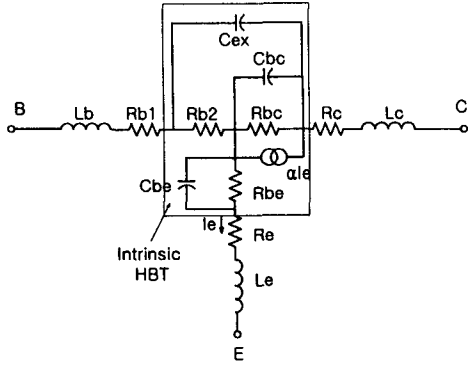


그림 3. 능동 모드의 HBT 등가회로

진성 파라미터를 추출하기 위해서는 우선 α , $Y_{bc}R_{b2}$, $Y_{be}R_{b2}$ 를 계산한 후, Y_{bc} , R_{b2} , Y_{bc} , C_{ex} 를 추출해야 한다. α 는 식(17)를 이용하여 계산할 수 있으며, 식(18)과 같이 $1/|\alpha|$ 를 ω^2 에 대하여 선형화 한 후, 1차식으로 외삽 함으로써 α_0 , τ , ω_a 를 구할 수 있다. 그 결과는 그림 4와 같다.

$$\alpha = \frac{Y_{21} - Y_{12}}{Y_{11} + Y_{21}} = \frac{\alpha_0 e^{-j\omega\tau}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_a}} \quad (17)$$

$$\left| \frac{1}{\alpha} \right|^2 = \frac{1}{\alpha_0^2 \omega_a^2} \omega^2 + \frac{1}{\alpha_0^2} \quad (18)$$

$Y_{bc}R_{b2}$ 는 식(19)에 의해 구할 수 있다.

$$Y_{bc}R_{b2} = j\omega C_{bc}R_{b2} + G_{bc}R_{b2} = \frac{Y_{22} + Y_{12}}{Y_{11} + Y_{21}} \quad (19)$$

마지막으로 $Y_{be}R_{b2}$ 는 다음 식(20)를 이용하여 낮은 주파수 범위에서 세 번째 항이 첫 번째, 두 번째 항에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정하에 α 구하는 방법과 유사한 방법을 사용하여 구할 수 있다. 그림 5는 $Y_{be}R_{b2}$ 를 선형화하여 1차식으로 외삽한 결과를 보여주고 있다.

$$Re[-(Y_{12} + Y_{22})] = Re[Y_{12}]G_{bc}R_{b2} - \omega Im[Y_{12}]C_{bc}R_{b2} - \omega^2 C_{ex}C_{bc}R_{b2} \quad (20)$$

$$Y_{be} = (Y_{11} + Y_{12})(1 + Y_{bc}R_{b2}) + Y_{21} + Y_{22} \quad (21)$$

식(20)을 통해 얻은 값을 식(21)에 대입하면 Y_{be} 값을 추출할 수 있으며, 이 값을 가지고 나머지 진성 파라미터 값 R_{b2} , Y_{bc} , C_{ex} 를 순차적으로 복잡한 과정 없이 직접 추출할 수 있다. 그러나 $Y_{be}R_{b2}$ 를 계산하는 과정에서 세 번째 항을 무시하고 근사 시키는 방법을 사용했기 때문에 좀더 정확한 진성 파라미터를 추출하기

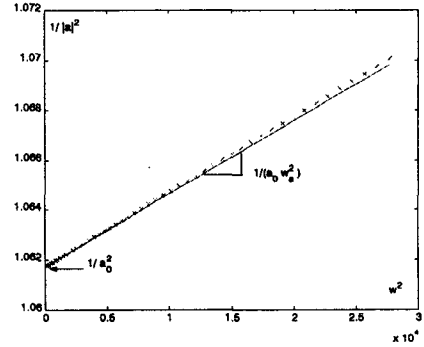


그림 4. α_0 , ω_a 추출

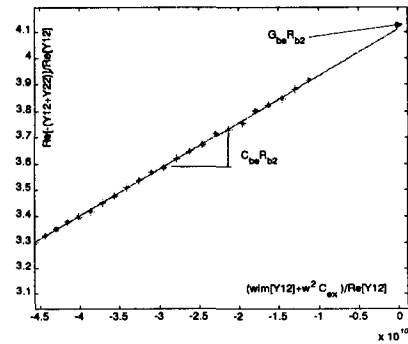


그림 5. $Y_{be}R_{b2}$ 추출

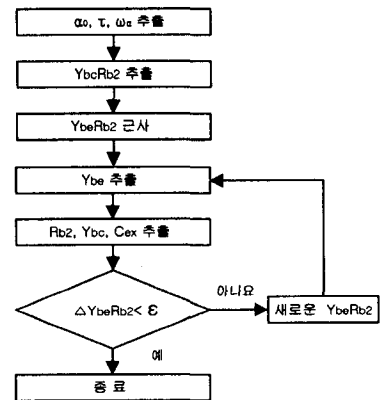


그림 6. 능동모드 파라미터 추출과정

위해서는 그림 6과 같은 일련의 과정을 반복해야 한다.[6]

2.3 파라미터 추출 결과

위와 같은 방법으로 $2 \times 100 \mu\text{m}^2$ GaAs/InGaP HBT의 소신호 파라미터 값을 추출하였으며, 추출결과는

표 1에 정리되어있다. 그림 7과 그림 8은 각각 Cutoff 모드와 능동 모드에서의 측정 S-파라미터와 모델 S-파라미터를 비교한 것이다.

표 1. 파라미터 추출결과

| 파라미터 | 추출값 | 파라미터 | 추출값 |
|-------------------|--------|------------------|---------|
| Lb (pH) | 47.02 | Rbe (Ω) | 9.194 |
| Lc (pH) | 5.06 | Cbc (fF) | 4.208 |
| Le (pH) | 19.67 | Cbe (pF) | 0.47 |
| Rb1 (Ω) | 1.61 | Cex (fF) | 73.614 |
| Rc (Ω) | 2.56 | α_0 | 0.9705 |
| Re (Ω) | 2.23 | τ (psec) | 3.378 |
| Rbc (k Ω) | 824.58 | f α (GHz) | 298.9 |
| Rb2 (Ω) | 37.8 | Error | 1.304 % |

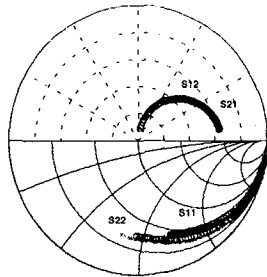


그림 7. 2 - 26.5 GHz 범위에서 측정 S-파라미터(x)와 모델 S-파라미터(o)와 비교 (Vc=0V, Vb=-2.5V)

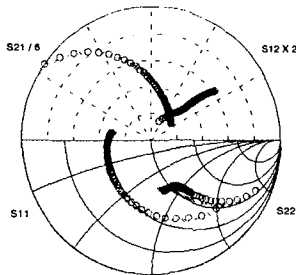


그림 8. 2 - 26.5 GHz 범위에서 측정 S-파라미터(x)와 모델 S-파라미터(o)와 비교 (Vce=3V, Ic=10.5mA)

III. 결론

본 논문에서는 바이어스에 독립적인 외인성 파라미터 값을 Cutoff 모드에서 추출하고, 이들을 이용하여 능동 모드에서 진성 파라미터 값을 추출하였다. 파라미터

추출시 초기에는 근사 시키는 방법 때문에 발생하는 오차를 줄이기 위하여 반복적인 방법을 사용하였다. Cex로 인해 파라미터 추출의 어려운 점을 극복하기 위하여 간단한 선형화 기법을 사용하였고, 1차식으로 외삽하는 방법을 도입함으로써 파라미터를 복잡한 과정 없이 직접 추출하였다. 그림 8에서와 같이 5 GHz 이하의 낮은 주파수 영역에서 오차가 3 - 5 % 이며, 이는 외인성 인덕턴스의 추출에 사용되었던 C1과 C3 값이 정확하지 않기 때문이라 추정된다. 그러나 측정된 전 주파수대역에서 측정 S-파라미터와 모델 S-파라미터의 오차가 약 1.3 %로 모델 S-파라미터가 측정 S-파라미터와 잘 일치한다. 또한, 본 연구에 사용된 방법은 측정 S-파라미터로부터 소신호 등가모델 파라미터를 직접 추출하므로 HBT 소자구조나 공정은 무관하게 적용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정보통신연구진흥원 '99 대학 기초연구지원 사업에 의한 연구 결과입니다.

참고문헌

- [1] Damian Costa, William U. Liu, "Direct Extraction of the AlGaAs/GaAs Heterojunction bipolar Transistor Small-Signal Equivalent Circuit", IEEE MTT, pp2018-2024, September, 1991.
- [2] L. Macho Cacho, A. Werthof, "Broadband 40GHz Si/SiGe HBT equivalent circuit using a successive analytical model parameter extraction", Dig. European Microwave Conf., pp515-517, 1993.
- [3] M. Rudolph, R. Doerner, "Direct Extraction of HBT Equivalent-Circuit Elements", IEEE MTT, pp82-84, January, 1999.
- [4] Ce-Jun Wei, "Direct Extraction of Equivalent Circuit Parameters for Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE MTT, pp2035-2040, September, 1995.
- [5] Y. Gobert, P. J. Tasker, "A Physical, Yet Simple, Small-Signal Equivalent Circuit for the Heterojunction bipolar Transistor", IEEE MTT, pp149-153, January, 1997.
- [6] Ulrich Schaper, "Analytical Parameter Extraction of the HBT Equivalent Circuit with T-Like Topology from Measured S-Parameters", IEEE MTT, pp493-498, March, 1995.