

1-10GHz 대역에서의 SiGe HBT's 소신호 입력 임피턴스 Parameter 추출 방법

김도형, 이상홍*, 구용서**, 안 철
서강대학교 전자공학과, *ETRI, **서경대학교 전자공학과
전화 : (02) 706-3401 / 팩스 : (02) 706-4216

1-10GHz, Input Impedance Parameter Extraction Method of SiGe HBT

Do-Hyung Kim, Sang-Heung Lee,* Yong-Seo Koo**, Chul An
Dept. of Electronic Eng. Sogang Univ., *ETRI, **Dept. of Electronic Eng. Seokyeong Univ.
E-mail : avantdoh@dreamwiz.com

Abstract

In this paper, we present a high-performance SiGe HBT's RF input impedance parameter extraction method. The SiGe HBT has emitter width of $0.5\mu\text{m}$ and length of $6\mu\text{m}$.

S-parameter has been measured with the collector current of $1\sim 3\text{mA}$, using on-wafer RF measuring system.

The pre-calculation method was used in order to overcome the local minimum problem. This method enabled us to extract a RF($1\sim 10\text{GHz}$) input impedance parameter.

I. 서론

이동 통신 시스템이 저가의 RF front-end단을 필요로 함으로써, 각광받게 된 Silicon MMIC 공정 기술인 SiGe HBT는 앞으로 GaAs로 대표되는 화합물 반도체를 점점 대체할 것으로 보여지며, 특히, $1\sim 10\text{GHz}$ 대역인 GSM, DECT, PCS, WLAN, SAT TV등에 쓰여질 것이라 예상된다.^{[1][2]}

또한, 가격면에서의 장점뿐만 아니라, 높은 집적 밀도와 높은 열전도도의 특성을 가져 power amplifier 설계시에도 우수한 성능을 구현할 수 있을 뿐만 아니라,

BiCMOS로 구현할 경우, RF단뿐만 아니라, analog to digital converter, DSP등 디지털 신호 처리단까지 집적 할 수 있어, system on a chip을 구현 가능하다. 하지만, 이런 장점을 가진 SiGe HBT이지만, 아직 국내에서는 소자에 대한 연구가 미약하다. 따라서, 본 연구에서는 SiGe HBT가 RF 소자로써 주로 쓰이기 때문에 대신호 특성보다는 RF 특성에 대해 중점을 두어, SiGe HBT의 RF 입력 임피턴스 특성에 영향을 주는 parameter들을 측정된 s-parameter에서 추출하였다.

II. 실험 방법

본 연구에 사용된 SiGe HBT 소자는 에미터 폭이 $0.5\mu\text{m}$, 길이는 $6\mu\text{m}$ 이며, 바이어스 조건은 컬렉터 전류가 1mA 부터 3mA 까지 측정하였다.

on-wafer 상태로 측정, 패드는 G-S-G 패턴으로 하였으며, 패드와 여러 메탈라인의 기생성분을 없애기 위해 open/short 패턴을 측정, de-embedding을 수행하였다.

측정 장비는 HP4142B로 바이어스를 인가한 상태에서 HP vector network analyzer 8510B를 사용하여, s-parameter를 측정하였다.

그 다음, s-parameter를 h-parameter로 변환 후, 입력 임피턴스에 영향을 주는 소신호 모델 parameter를 추출하였다.

III. HBT의 입력단 DC 특성

일반적으로 공통 에미터 구조의 바이폴라 소자의 입력단은 r_x , C_x 로 구성된다.^[3]

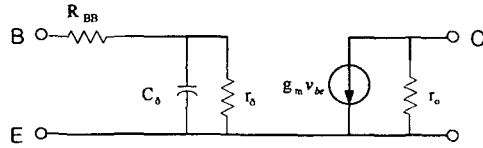


그림 1 소신호 모델

$$r_x = \frac{\beta}{g_m} \quad (1)$$

$$C_x = g_m \tau_B \quad (2)$$

$$\tau_B = \frac{w_B^2}{2 V_T \mu_n K_{bi}} \quad (3)$$

여기서, $V_T = \frac{q}{kT}$, $K_{bi} = 1 + \left(\frac{E_{bi} w_B}{V_T} \right)^{3/2}$

$$g_m = \frac{q I_C}{\eta k T} \quad (4)$$

R_{BB} 는 r_x 보다 매우 작은 값이 보통이므로, DC 분석 시는 무시할 수 있다.

여기서, k 는 Boltzmann 상수이고, T 는 절대 온도 값을 나타내며, E_{bi} 는 built-in field, C_x 는 접합 커패시턴스 값이 확산 커패시턴스 값보다 작아서 무시한다는 가정을 한 식이다.

그림 1의 회로를 2-port h-parameter로 표현하면, 입력 임피던스는 h_{11} 이 된다. 위의 가정을 따라 R_{BB} 를 무시하면, r_x , C_x 는 서로 병렬연결이므로,

$$\frac{1}{h_{11}} = \frac{1}{r_x} + j\omega C_x \quad (5)$$

로, 유도 할 수 있다.

IV. S-parameter 측정 및 입력 임피던스의 RF 특성

그림 2, 3은 측정된 s-parameter중 입력 임피던스에 영향을 받는 S_{11} 을 smith chart로 나타낸 것이다. 입력단의 임피던스를 분석하기 위해, 측정된 s-parameter를 h-parameter로 변환 시켜야만 한다.^[4]

Smith Chart

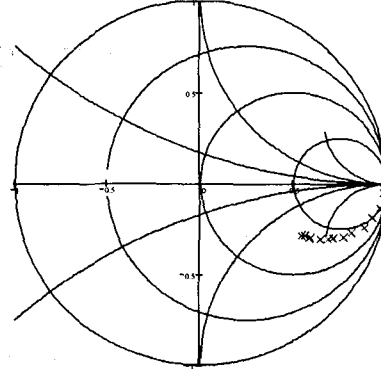


그림 2 $I_C=1mA$, $V_C=1V$ 에서의 S_{11}

Smith Chart

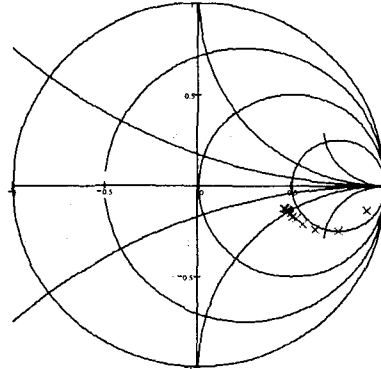


그림 3 $I_C=3mA$, $V_C=1V$ 에서의 S_{11}

$$h_{11} = Z_o \cdot \frac{(1 + s_{11})(1 + s_{22}) - s_{12}s_{21}}{(1 - s_{11})(1 + s_{22}) + s_{12}s_{21}} \quad (6)$$

식 (6)을 이용해서, $1/h_{11}$ 을 바이어스에 따라, 실수 부분 (그림 4), 허수 부분 (그림 5)을 그래프로 표현하였다.

식(5)에 의하면, 실수 부분과 허수 부분은 주파수에 대해 직선이 되어야한다. 하지만, 측정 결과는 실수 및 허수 모두 곡선을 가지게 된다. 그 이유는 DC 특성에서 무시하였던, 베이스 저항 부분인 R_{BB} 가 높은 주파수 특성에선 무시 할 수 없는 부분이 되기 때문이다.

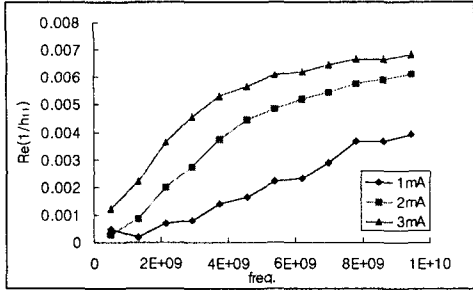


그림 4 1/h11의 실수 부분

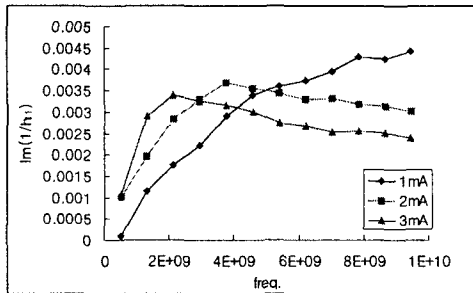


그림 5 1/h11의 허수 부분

R_{BB} 를 무시하지 않고 다시 풀면,

$$\text{Re}(h_{11}) = R_{BB} + \frac{1/r_{\pi}}{(1/r_{\pi})^2 + j\omega C_{\pi}} \quad (7)$$

$$\text{Im}(h_{11}) = \frac{\omega C_{\pi}}{(1/r_{\pi})^2 - (\omega C_{\pi})^2} \quad (8)$$

으로, 두 부분 모두 주파수에 대해 곡선으로 나타내게 된다.

V. 입력 임피던스 parameter 추출 방법

SiGe HBT의 입력 임피던스는 소자의 특성에 전반적으로 영향을 미치는 중요한 parameter이다.

커패시터 부분은 cut-off frequency에 영향을 주고, base 저항은 특히 노이즈특성에 영향을 끼치게 된다.^[5] 그러므로, 입력 임피던스를 구성하는 R_{BB} , r_{π} , C_{π} (그림1 참조)를 정확히 추출하는 것이 소신호 모델 parameter 추출의 기본이 된다.

하지만, hybrid- π 모델에서 lumped-element 회로를 이용하여, 모든 주파수에서 만족시키는 parameter를 추출하는 것은 용이하지 않다. 또한, s-parameter를 측정하여 직접 이들을 뽑을 수 있는 방법이 없기 때문

에, 측정 data를 만족시킬 수 있게, 수치 해석적인 방법을 사용하여 추출하여야 한다.^{[6][7][8]}

일반적으로 parameter 추출방법에 가장 많이 쓰이는 알고리즘은 gradient descent방법이다.^[7]

이 방법은 주파수에 대해서 비선형 특성을 가지는 소신호 모델 parameter들을 추출하는 것에는 적합한 알고리즘이나, 초기치에 따라서는 추출값이 달라지는 경향이 있다.

이러한 경향은 측정값과 모델링 함수 사이의 오차를 줄이는 과정 중에서, 초기치 근처의 극소치에서 벗어나지 못하고, 측정값과는 많이 벗어난 값을 해로 출력하기 때문이다.

이를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 수치 해석 알고리즘을 사용하기 전에, 적합한 초기치부터 계산을 수행하는 pre-calculation을 사용하였다.

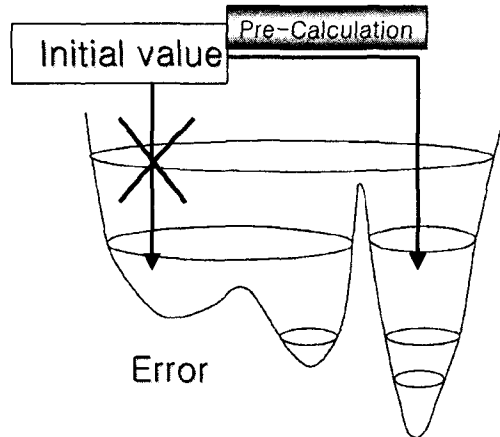


그림 6 Pre-calculation의 수행 목적

pre-calculation은 정확한 값을 찾는 것이 목적이 아니라, 추출할 값들의 초기치들을 물리적으로 제한을 두는 것을 목적으로 하기 때문에 정확하나 복잡한 모델식을 쓰지 않고, 일반적으로 사용하는 간결한 수식 (1)(2)(3)(4)를 사용하였다.

pre-calculation에서 사용되는 값들은 DC 바이어스 조건에서 구할 수 있었다. 위의 수식들에서 알 수 있듯이 바이폴라 소자들은 컬렉터 전류에 따라서 r_{π} , C_{π} 가 크게 변하기 때문에, 다른 값들보다 우위를 가지게 되어, 다른 값들은 상대적으로 둔감하게 된다. 그러므로, 바이어스 값들만으로도 그 값들을 어느 정도 추측 가능하다.

VI. Parameter 추출 결과

그림 7, 8, 9는 각 바이어스에 따른 측정치(실수부:●, 허수부:■)와 제안한 pre-calculation 방법으로 추출한 결과를 가지고 모델링(직선: —)한 것을 비교하여 나타낸 것이다.

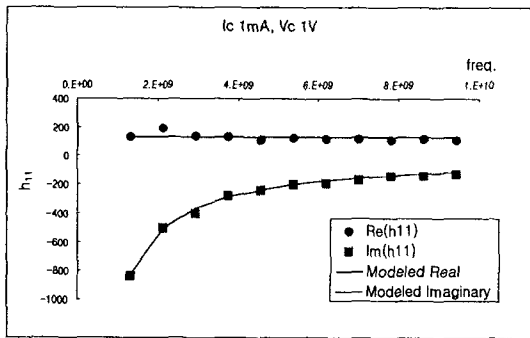


그림 7 Ic=1mA일 때, 추출값과 실험값

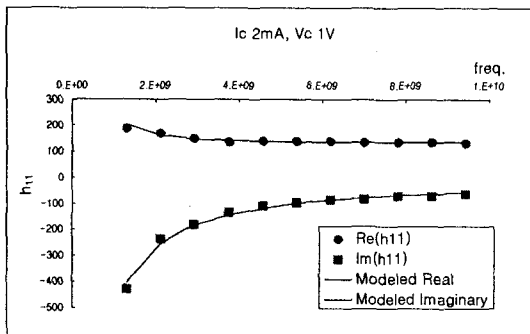


그림 8 Ic=2mA일 때, 추출값과 실험값

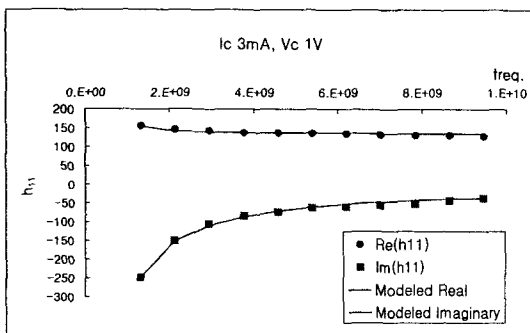


그림 9 Ic=3mA일 때, 추출값과 실험값

VII. 결론

본 논문에서 제안한 방법으로 입력 임피던스 parameter들의 추출을 수행하여, h-parameter로 계산한 결과 그림7, 8, 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1~10GHz까지 s-parameter 측정 결과에서 hybrid- π 소신호 모델 parameter 가운데 입력 임피던스를 구성하는 R_{BB} , r_x , C_x 만을 사용하여, 모델링 및 parameter들을 추출 할 수 있었을 뿐만 아니라, analytical과 numerical한 방법을 동시에 사용함으로써, 물리적 이해와 수치적 해석의 정확함을 동시에 만족시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Rainer Götzfried et al, "RFIC's for Mobile Communication Systems Using SiGe Bipolar Technology", IEEE MTT, pp661-668, 1998
- [2] Andreas Schuppen, "SiGe-HBTs for mobile communication", solid-state electronics pp1373-1381, 1999
- [3] C.Y. Chang, S.M. Sze, "ULSI Devices" , Jhon Wiley & sons, pp35-39 ,2000
- [4] Reinhold Lubwig, Pavel Bretchko "RF Circuit Design." prentice hall, pp366-368, 2000
- [5] Guofu Niu et al, "Noise Parameter Optimization of UHV/CVD SiGe HBT's for RF and Microwave Applications" pp1589-1598 ,1999
- [6] Hafedh Ghaddab et al, "Small-Signal Modeling of HBT's Using a Hybrid Optimization/Statistical Technique", pp292-298 ,1998
- [7] Griff L. Bilbro et al, "Extraction of the Parameters of Equivalent Circuits of Microwave Transistors Using Tree Annealing", IEEE MTT pp1711-1718 ,1990
- [8] William H. Press et al "Numerical recipes in C." 2nd edition, Cambridge Univ. Press, pp681-706 ,1999