

---

# 파라미터 직접 추출법을 이용한 스케일 가능한 HBT의 모델링

서영석\*

## Scalable HBT Modeling using Direct Extraction Method of Model Parameters

Youngsuk Suh\*

### 요 약

새로운 전류원 모델과 이 전류원 모델에 대응하는 파라미터의 직접추출 방법을 제안하였다. 전류원 모델파라미터를 위한 정확하고 해석적인 계산방법을 유도하였다. 이러한 해석적 모델링 방법을 기반으로 스케일 가능한 HBT 모델을 만드는 방법에 적용되었다. 단조함수적 스케일링이 가능하도록 하도록 하기위해, 모델링 과정에서, 몇몇 파라미터들의 중복성(redundancy)을 제거하는 방법을 개발하였다. 이러한 방법에 기반을 둔 모델을 실제 소자에 적용했을때, 소자의 온도, 바이어스 및 크기변화를 잘 예측할 수 있었다.

### ABSTRACT

A new HBT current source model and the corresponding direct parameter extraction methods are presented. Exact analytical expressions for the current source model parameters are derived. This method is applied to scalable modeling of HBT. Some techniques to reduce redundancy of the parameters are introduced. The model based on this method can accurately predict the measured data for the change of ambient temperature, size, and bias.

### 키워드

통신소자, HBT, RF Modeling, Circuit Modeling

## 1. 서 론

HBT (Hetero-junction Bipolar Transistor)는 휴대전화기를 비롯한 고주파 무선통신용 전력소자에 가장 많이 사용되는 트랜지스터이다. 이 소자를 사용해서 회로설계를 할 때, 스케일 가능한 모델은 소자의 크기를 바꾸어 가면서 설계할 필요가 있을 때 대단히 유용하게 사용된다. 가장 간편한 스케일 모델은 선형적인 스케일이 가능하도록 만들어진 모델이다. 이는 어떤 소자의 크기가  $n$  배가 될

때, 단순히 모델도  $n$  개를 병렬로 연결한 것과 같은 특성을 나타내도록 한 모델이다. 이러한 선형적 모델은 소자의 두께가 얇고 소자의 면적이 두께에 비해 충분히 넓어서 개수가 많은 경우에만 잘 적용될 수 있다. 에미터의 개수가 작은 경우나 열 저항이 높은 경우 HBT의 전기적 특성은 크기에 선형적으로 잘 적용되지 못하고 비선형적 특성을 나타내며 이는 소자의 열적 특성과 전기적 특성의 비선형성에 기인한다 [1][2]. HBT의 전류원 모델은 Gummel-Poon 모델에 기반을 둔 모델을 많이 사

용한다. 전류원 모델의 전류를 결정하는 가장 중요한 파라미터는 역방향 포화전류와 이상계수(Idealty Factor)이다. 이들 파라미터는 HBT소자의 Gummel-곡선(Gummel-Plot)의 저전류 영역에서 추출되며, 물리적인 관점에서 유용한 정보를 많이 제공한다. 그러나 이러한 방법으로 추출된 파라미터를 기반으로 한 모델은 높은 전류밀도의 영역에서 실제 측정된 데이터를 잘 예측하지 못하는 단점이 있다. 이는 열 저항의 비선형적인 특성과 에미터 전기저항에 기인한다. 따라서 Gummel-곡선으로부터 추출된 파라미터는 높은 주파수 영역을 위해 다시 최적화 하는 과정을 거쳐야 한다 [3]. 만약, 여러 가지의 크기를 가지는 소자들에 대해 개별적으로 파라미터 최적화 과정을 수행했을 때, 추출된 파라미터들은 소자의 크기에 대해 단조 증가하거나 감소하는 일정한 경향을 보여주지 못할 수 있다. 이는 근본적으로 오차의 국부최소점(local minimum)값들이 많이 존재하기 때문이다.

본 논문에서는 새로운 전류원 모델과 최적화 과정 없이 직접 추출할 수 있는 방법을 개발하였다. 이 전류원 모델링 방법은 높은 전류원 데이터로부터 최적화 과정 없이 직접 추출에 의한 모델링 방법에 기반을 두고 있다. 단조 함수적 스케일 특성을 나타내지 못하는 적은 에미터 개수를 가지는 InGaP/GaAs HBTs 에 적용하였으며, 좋은 스케일 특성을 나타내었다.

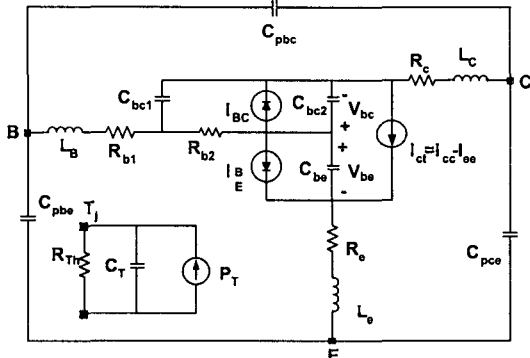


그림 1. HBT 대신호 등가회로  
Fig. 1 Large Signal Equivalent Circuit for HBT

## II. 단일 HBT 전류원 모델링

기존의 SPICE에서 사용되는 Gummel-Poon 전류원 모델 파라미터는 저 전류 수준의 데이터로부터 계산되어지며 선형 활성화영역의 전류전압 특성곡

선을 잘 예측하지 못한다. 따라서 기존의 모델링 방법은 반드시 모델파라미터에 대한 최적화과정을 거쳐야했다. 본 논문에서는 그림1과 같은 대신호회로에 대해, 최적화과정이 필요 없는 전류원 모델에 대해 소개하고 이를 기반으로 여러 가지 크기를 가지는 소자에 대해 적용할 수 있는 스케일 모델에 대해 논한다.

$$I_{CC} = \exp(A_0 + A_1 V_{be} + A_2 (R_{th} P_d + \Delta T_a)) - \exp(A_0) \quad (1)$$

$$I_{BE} = \exp(B_0 + B_1 V_{be} + B_2 (R_{th} P_d + \Delta T_a)) - \exp(B_0) \quad (2)$$

$$I_{EC} = \exp(C_0 + C_1 V_{be} + C_2 (R_{th} P_d + \Delta T_a)) - \exp(C_0) \quad (3)$$

$$I_{\alpha} = \exp(D_0 + D_1 V_{be} + D_2 (R_{th} P_d + \Delta T_a)) - \exp(D_0) \quad (4)$$

여기서 파라미터 A1~D1, A2~D2, A0~D0 들은 전압, 접합부 온도, 및 소자의 크기에 의해 변화하는 전류의 크기를 결정하기 위한 파라미터들이며, R<sub>th</sub>는 소자의 열 저항이며, P<sub>d</sub>는 소자 내부에서 모소되는 전력이다. ΔT<sub>a</sub>는 측정시의 기준온도(상온=27oC)로부터 외부온도의 변화를 나타내는 파라미터이다. 이는 현재의 온도와 모델링을 위해 측정된 데이터의 온도와의 차이를 의미한다. 예를 들면, 그림 2의 원으로 표시된 데이터는 300oK에서 측정된 값이고, 이를 기반으로 모델을 만들어서 310oK에서 회로설계자가 사용한다면, 310oK가 현재온도가 되고, 300oK는 모델링할 때의 온도가 되며 ΔT<sub>a</sub>=(310-300)oK가 된다.

정상 활성화 영역(Normal Active Region)에서 DC-IV 특성곡선상의 전류는 I<sub>cc</sub>와 I<sub>be</sub>에 의해 결정된다. exp(A<sub>0</sub>) 및 exp(B<sub>0</sub>) 값은 대단히 작아서, 고전류 영역에서 위의 식(1) 및 (2)의 -exp(A<sub>0</sub>) 항은 생략 될 수 있다. 따라서 위의 식 (1)은 정상활성화 영역에서 컬렉터 터미널전류(I<sub>ct</sub>)와 동일하며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$I_{ct} \approx I_{cc} = \exp(A_0 + A_1 V_{be} + A_2 (R_{th} P_d + \Delta T_a)) \quad (5)$$

위의 식의 양변에 log를 취하면 다음식과 같이 변형된다.

$$\ln(I_{ct}) = A_0 + A_1 V_{be} + A_2 (R_{th} P_d + \Delta T_{\omega}) \quad (6)$$

위의 식 (6)에서 파라미터 A0, A1, A2, Rth 들은 모델링 되어야 하는 파라미터이다. 4개의 미지수를 가지는 선형 대수방정식이다. 이 대수 방정식의 변수는 측정데이터로부터 구해질 수 있는 Vbe와 Ict이며, 그림 2 와 같은 정상활성화 영역의 특징한 한 지점의 데이터로부터 얻을 수 있으며 이를 위의 식(6)에 대입하면 한 개의 대수방정식이 얻어진다. 이상적으로는 4개 지점의 데이터가 있으면 파라미터들을 구할 수 있다.

파라미터 A0, A1, A2, 및 Rth값을 해석적으로 계산하기 위하여 다음과 같은 선형 대수 방정식 ( $P_1 x_1 = Q_1$ ) 를 세울 수 있으며, P1, x1, Q1은 각각 다음과 같다.

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & V_{be,1} & P_{d,1} & (T_{a,1} - T_{a,0}) \\ 1 & V_{be,2} & P_{d,2} & (T_{a,2} - T_{a,0}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & V_{be,n} & P_{d,n} & (T_{a,n} - T_{a,0}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$x_1 = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ a_2 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad Q_1 = \begin{bmatrix} \ln(I_{ct,1}) \\ \ln(I_{ct,2}) \\ \vdots \\ \ln(I_{ct,n}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $a_2 = A_2 R_{th}$ 이며, 접합부 전압(Vbe)는 다음과 같은 식을 이용해서 구해진다.

$$V_{be} = V_{bet} - (R_{th} + R_{\omega}) I_{ct} - R_e (I_{ct} + I_{ct}) \quad (9)$$

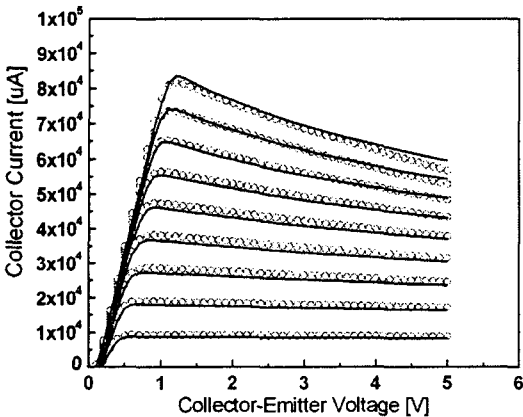


그림 2 네 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT의 300oK에서의 측정치(원)와 모델링된 데이터(선)  
Fig. 2 Measured and Modeled Ict-Vcet Curves of 4 finger 2x20um Size HBT at 300 oK

여기서 Vbet는 베이스-에미터사이의 외부 터미널 전압이고, Ibt는 베이스 단자에 유입되는 터미널 전류를 의미한다. 위의 식(9)에서 베이스 영역의 전체 저항 ( $R_{th} + R_{\omega}$ )은 논문 [4][5]에 언급된 방법으로 구한다.

여러 가지 크기를 가지는 HBT에 이러한 방법을 적용시키기 위해 1개에서 4개까지 다양한 개수의 핑거를 가지는 2umx22um InGaP/GaAs HBT를 300oK와 310oK에서 측정해서 위의 식에 적용시켰다. 식(7)에 들어있는 모델 파라미터를 구하기 위해 위의 식(6)~(8)로 이루어진 선형 대수 방정식의 해를 구하면 된다.

정상 활성화 영역에서 측정된 8개의 데이터를 이용해서 식(6)~(8)로 이루어진 과대결정선형대수 방정식(over-determined linear equation)을 세울 수 있고, 유사역변환 (pseudo-inverse)과정을 통해 식(7)의 정확한 해를 구할 수 있다. 과대결정선형대수 방정식의 유사역변환 해는 주어진 데이터의 자승오차를 최소화하는 해이다. 열 저항 값은 구해진 해의 두 개의 결과 (a2와 A2)로부터 다음과 같은 식을 이용해서 구해질 수 있다.

$$R_{th} = \frac{a_2}{A_2} \quad (10)$$

비슷한 방법으로 베이스 전류에 대해서도 선형 대수방정식을 세울 수 있다. 위의 (10)식을 통해 결정된 열 저항을 위의 식(2)에 대입하면 다음과 같은 선형 대수방정식을 세울 수 있다.

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & V_{be,1} & R_{th} P_{d,1} + T_{a,1} - T_{a,0} \\ 1 & V_{be,2} & R_{th} P_{d,2} + T_{a,2} - T_{a,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & V_{be,n} & R_{th} P_{d,n} + T_{a,n} - T_{a,0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \ln(I_{bt,1}) \\ \ln(I_{bt,2}) \\ \vdots \\ \ln(I_{bt,n}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

위의 식(6)~(8)을 이용해서 식(7)에 포함된 파라미터를 구하는 과정과 비슷한 방법으로 위의 식 (11)~(13)에, 측정된 데이터를 대입해서 식(12)에 포함된 파라미터 B0, B1, 및 B2를 구할 수 있다.

전류원 모델  $I_{bc}$ 와  $I_{ee}$ 는 역방향 모드에서만 동작하는 전류원 이므로 순방향 모드인 정상 활성화 영역에서는 무시될 수 있는 전류항이다. 이들 전류원은 컬렉터-에미터 사이의 외부 터미널 전압인  $V_{cet}$ 가 0V 근처의 낮은 전압에서만 영향을 미친다. 따라서 이들 전류원에 대해서는 온도 의존성을 제거해도 측정된 전압 전류 특성곡선을 잘 예측할 수 있다. 이들 전류원 모델에서 중요한 파라미터는  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $D_0$ , 및  $D_1$ 이며 역방향 Gummel-Plot으로부터 쉽게 구해 질 수 있다.

### III. 스케일 가능한 전류원 모델링

위의 절에서 논의한 방법으로 서로 다른 크기를 가지는 단일 소자에 대한 대신호 모델링이 가능하다. 이 방법은 기존의 Gummel-Poon 모델에서 사용되는 파라미터 추출 방법과는 달리 최적화 과정 없이 최적해를 구할 수 있음을 알 수 있었다. 제안된 방법은 수치최적화 과정이 필요하지 않다. 최적화 방법으로 파라미터를 추출하면 소자의 크기에 따라 단조 함수적 경향을 보이지 않게 된다. 이는 오차의 국부적 최소치(local minimum) 지점이 여러 개 존재하는 것에 기인한다. 위에서 제안한 과정은 최적화 과정이 없으므로 모델 파라미터에 대해 단조 함수적 추출이 가능하다. 서로 다른 크기의 HBT에 대한 파라미터들의 중복성(redundancy)을 제거하기 위해 그림 8에서처럼  $A_2/A_1$  을 상수 값으로 강제로 설정하였다. 비율  $A_2/A_1$ 의 의미는 컬렉터 전류를 일정하게 유지 시킬때, 접합부의 온도 변화에 따른 베이스-에미터 전압변화를 의미한다 ( $dV_{be}/dT$ ). 이 비율은 소자의 크기에 상관없이 일정하여야 한다. 왜냐하면, 온도에 따른 접합부 전압 변화는 InGaP/GaAs 웨이퍼의 물리적 특성에 의해 결정되는 물리 상수 이기 때문이다. 단일 핑거를 가지는 HBT에 대해 위의 식(7)로부터 계산된  $A_2/A_1$ 값은  $-1.18mV/oC$  이었다. 이 값은 다른 크기의 HBT의 파라미터를 구하는 과정에 그대로 적용되었다. 이러한 강제 조건(constraint) 하에 1개~4개의 핑거를 가지는 2x20um InGaP/GaAs HBT에 대해 다른 모든 파라미터들을 위의 II절에서 언급한 방법으로 구했다. 구해진 파라미터는 그림5~8에 나타내었다. 그림5는  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$ 값을 나타낸 것이고, 그림 6은  $A_2$ ,  $B_2$ 및  $R_{th}$ 를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼 추출된 파라미터는 모두 단조(monotonous) 함수적으로 변화함을 알 수 있다.

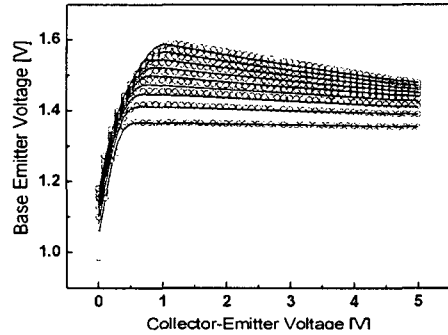


그림 3 한 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT를 300oK에서의  $I_{bt}=50\mu A \sim 450\mu A$ , 까지 50uA 단계로 변화시킬 때, 모델값과 측정된 값  
Fig. 3 Measured and Modeled  $V_{bet}-V_{cet}$  Curves 1 finger 2x20um HBT  $I_{bt}=50\mu A \sim 450\mu A$ , 50uA Step at 300oK

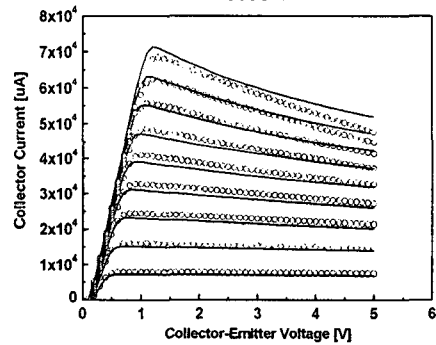


그림 4 세 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT를 310oK에서  $I_{bt}=150\mu A \sim 1350\mu A$ 까지 150uA 단계로 변화시킬 때, 측정치와 모델링된 데이터  
Fig. 4 Measured and Modeled  $I_{ct}-V_{cet}$  Curves of 4 finger 2x20um Size HBT at 310 oK,  $I_{bt}=150\mu A \sim 1350\mu A$ , 150 uA Step.

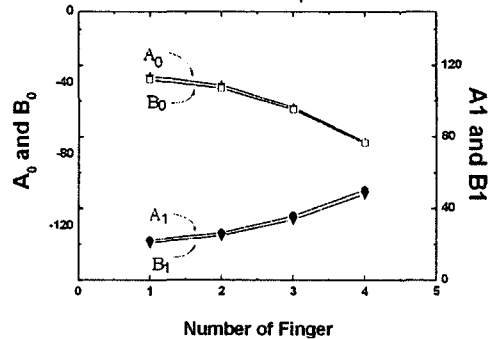


그림 5 한 개~네 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT에 대해 계산된  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$ ,  $B_1$  값.  
Fig. 5 Calculated  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$ ,  $B_1$ , for the 1~4 finger of 2x20um Size HBTs.

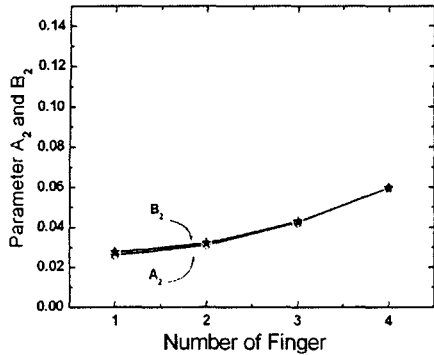


그림 6 한 개 ~ 네 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT에 대해 계산된 A2, B2 값.

Fig. 6 Calculated A2, B2, for the 1~4 finger of 2x20um Size HBTs.

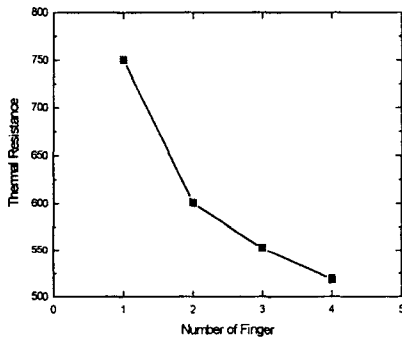


그림7 한 개 ~ 네 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT에 대해 계산된 열 저항 (Rth) 값.

Fig. 7 Calculated Thermal Resistance (Rth) for the 1~4 finger of 2x20um Size HBTs.

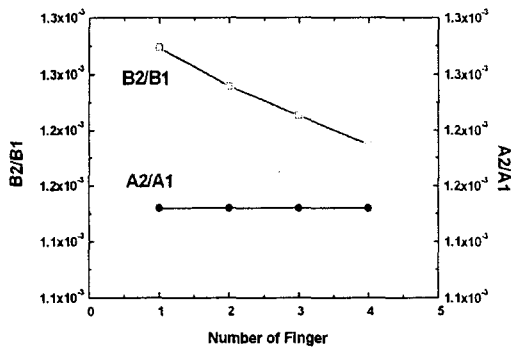


그림8 한 개 ~ 네 개의 2x20um 핑거를 가지는 HBT에 대해 계산된 B2/B1 및 A2/A1 값

Fig. 8 Calculated B2/B1 and A2/A1 for the 1~4 finger of 2x20um Size HBTs.

그림 2는 4개의 핑거를 가지는 HBT를 300oK에서 측정하고 모델링한 결과를 나타낸 것이다. 측정 결과는 원으로 표시된 데이터이며 모델은 선으로 표시되어 있다. 모델에 사용된 파라미터는 그림 5~7에 나타내져 있다. 그림3은 한 개의 핑거를 가지는 HBT에 대해 측정된 베이스-에미터 사이의 터미널 전류와 모델 파라미터를 이용해서 시뮬레이션된 값을 나타낸 것이다. 그림4는 세개의 핑거를 가지는 HBT에 대해 310oK에서 측정되고(원) 모델링된 값(선)을 나타낸 것이다. 그림 2~4에서 보는 것처럼 모델링된 데이터는 측정된 데이터 특성을 잘 예측함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

새로운 InGaP/GaAs HBT를 위한 새로운 대신 호 모델과 이에 대응되는 파라미터의 직접 계산 방법을 개발하였다. 이 방법은 파라미터를 위한 최적화 과정이나 조정과정이 필요 없다. 이를 기반으로 스케일 가능한 InGaP/GaAs HBT 모델을 개발했다. 1개~4개의 핑거를 가지는 HBT에 대한 적용 결과, 스케일 모델에 적합한 특성인 단조 함수적 양상을 나타내었다. 계산된 파라미터로 만들어진 모델은 온도변화, 크기, 전압, 전류등을 잘 예측함을 확인했다. 이 모델은 마이크로파 대역에서 HBT의 크기를 변화시키면서 회로를 설계할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] C. Snowden, "Large-signal microwave characterization of AlGaAs/GaAs HBT's based on a physics-based electron-thermal model," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, vol. MTT-45, no.1, pp. 58-71, January 1997.
- [2] M. Rudolph, et al, "Scalable GaInP/GaAs HBT Large-signal Model," 2000 IEEE MTTT Symposium Digest, pp.753~756.
- [3] H. Ghaddab, F. M. Ghannouchi, F. Choubani, and A. Bouallegue, "Small signal modeling of HBT's using a hybrid optimization/statistical technique," IEEE Trans.

on MTT, vol. 46, no.3, pp. 292-298, Mar. 1998.

- [4] Y. Suh, et al, "Direct extraction method for internal equivalent circuit parameters of HBT small-signal hybrid-pi model "2 000 IEEE-MTT Symposium Digest, pp.1 401~1404.
- [5]. Y. Govert etal, "A physical, yet simple, small signla equivalent circuit for the hetero-junction bipolar transistor," IEEE Trans. MTT, vol. 45, no. 1, Jan. 1997, pp. 149~153.

### 저자소개

#### 서영석(Youngsuk Suh)



1995년 3월 : 포항공과대  
학교 전자전기공학과 졸업,  
공학박사

1995년 9월 ~현재 :영남대학  
교 전자정보공학부 부교수  
※관심분야 : 마이크로파 회로해석 및 설계,  
RF소자 모델링, Signal and Power Integrity