

X-Band용 HBT의 전력 특성에 관한 연구
(Power Performance of X-Band Heterojunction
Bipolar Transistors)

이 재 회*, 김 언 태, 송 재 복, 원 태 영
인하 대학교 전자재료공학과 고속전자소자연구실

Jaehye Lee, Yountae Kim, Jaebok Song, and Taeyoung Won
Dept. of Electronic Materials and Devices Eng., Inha University
Tel: 032-860-7436, E-mail: ljh@hse1.emde.inha.ac.kr

Abstract

We report rf and power characteristics of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor (HBTs) for X-band power applications. HBTs have been fabricated with polyimide as an interlayer dielectric. By characterizing the DC and RF characteristics we obtained the maximum current gain of 45, BV_{CEO} of 10 V, f_T of 30 GHz and f_{max} of 17 GHz for device with $6 \times 14 \mu m^2$ emitter size. To extract accurate equivalent parameters, the De-embedded method was applied for extraction of parasitic parameters and the calculation of circuit equations for intrinsic parameters. Based on the Load-pull method, power characteristics was simulated and measured to get the maximum output power of the device.

I. 서론

최근 GaAs 이중접합 바이폴라 트랜지스터 (HBTs)는 출력 전력(output power), 그리고 전력 효율(power-added efficiency), 주파수 밴드 폭(frequency band width) 등의 마이크로웨이브 전력 증폭기 특성에 있어 주목할 만한 특성 향상을 가져왔다. 미국의 유수 업체에서는 최근 6-8GHz 밴드에서 38% 이상의 전력 효율(PAE)을, 8-14GHz 밴드에서는 40% 이상, 5-10GHz 밴드에서는 58% 이상의 전력효율을 보였고, X 밴드에서 출력 전력이 12Watt 이상의 HBT 전력 증폭기 특성을 보였다^{[1]-[3]}. 이러한 괄목할 만한 성장으로 HBT는 높은 효율과 출력 전력 특성을 요하는 전력 증폭기로서 MESFET을 대체하는 차세대 전력 증폭기 소자로 주목된다.

본 연구에서는 절연막으로 폴리이미드를 사용한 AlGaAs/GaAs HBT를 제작하였다.

HP4145B를 사용하여 소자의 DC 특성을 측정하였으며, HP8510C를 이용하여 소자의 고주파 특성을 측정하고 디임베딩(De-embedding) 방법을 이용하여 기생성분을 추출, 회로 방정식을 이용하여 내부소자의 등가모델 변수를 추출하였다. 또한 로드-풀 방법(load-pull method)을 이용하여 HBT 소자의 전력 특성을 시뮬레이션하고 측정하였다.

II. 소자제작 및 특성

본 연구를 위한 소자는 n-p-n emitter up Mesa 구조로 설계되었으며, 베이스의 불순물 농도를 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 두께를 $0.12 \mu\text{m}$ 로 설계하였으며, 높은 베이스 농도에 의한 정공의 역주입을 효과적으로 억제하기 위해 에미터의 Al 조성비를 30%로 설계하였다. 또한, 항복전압 특성을 향상시키기 위해 컬렉터의 불순물 농도를 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 두께를 $0.8 \mu\text{m}$ 로 설계하였다^[4]. 또한 각 전극간에 절연막에 의한 기생 축전용량을 줄이기 위해 낮은 유전율을 갖는 폴리이미드를 절연막으로 사용하였다^[5]. HBT 제작 공정에서 식각은 습식식각(wet etching)으로 인산계 식각액($1\text{H}_3\text{PO}_4:1\text{H}_2\text{O}_2:25\text{H}_2\text{O}$)을 사용하였고, n형 금속으로는 AuGe, 그리고 P형 금속으로는 AuZn을 이용하였다.

본 연구에서 제작된 HBT는 베이스 재결합(base recombination) 전류가 낮아, 컬렉터 전류가 수 μA 에서 수십mA 구간에서 전류이득이 매우 선형적인 특성을 보였으며, 에미터 크기가 $6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 인 HBT의 경우 최대 전류이득은 45, $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ 의 경우 87, $20 \times 28 \mu\text{m}^2$ 인 경우 102를 얻었다. 항복전압은 10V를 얻어 매우 안정된 동작 특성을 보였다. $6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 인 HBT의 I-V 특성을 그림 1에 도시하였다. HP8510C Network Analyzer를 이용하여 $6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 에미터 크기를 갖는 소자의 RF 특성을 측정하였다. $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 컬렉터 전류밀도에서 추출된 S-파라미터를 이용하여 AC 전류이득(H_{21})과

최대 유효 전력이득(MAG)을 그림 2에 도시하였다. 상기 소자로부터 f_T (차단주파수)는 30GHz, f_{max} (최대 공진 주파수)는 17GHz를 얻었다. 10GHz에서 AC전류이득은 7dB, MAG는 3.5dB를 얻었다.

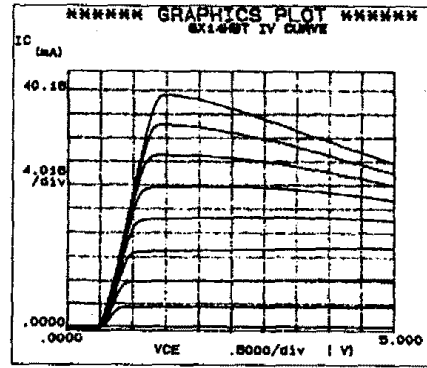


그림 1. 에미터 크기 $6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 인 HBT의 출력 특성. (전류이득(β)=40, BV_{CEO} =10V)

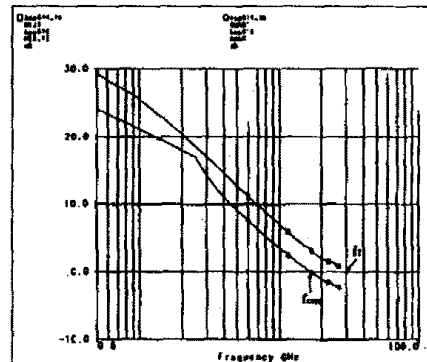


그림 2. $J_c=6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 에서 $|h_{21}|$ 및 MSG의 동작 주파수 의존성 ($f_T=30\text{GHz}$, $f_{max}=17\text{GHz}$)

III. 소신호 모델링

소신호 등가 모델 추출을 위해, 제작된 #1224 HBT를 이용하여 파라미터를 추출하였다. HP8510C Network Analyzer와 Cascade사의 Microtech Probe Station로부터 측정된 소신호 S-파라미터를 바탕으로, 테스트 패턴 OPEN, Thru, Short1·2로부터 패드에 의한 기생성분을 효율적으로 디임베딩(De-embedding)하였다. 기생성분이 제거된 등가모델로부터 각 단자의 직렬저항(R_b , R_c , R_e)는 실제소자의 S파라미터를

변환하여 얻어진 Z, Y-파라미터를 이용하여 식 (1),(2), 및 식(3)으로부터 다음과 같이 구해진다.^{[6],[7]}

$$R_{cc} = Re(Z_{22} - Z_{12}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{|Y_{21}|} \Big|_{\text{low frequency}} = \frac{\eta V_T}{I_c} + R_{cc} \quad (2)$$

$$R_{bb} = Re\left(\frac{1}{Y_{11}}\right) - R_{cc} - \frac{Re\left(\frac{Y_{21}}{Y_{11}}\right)}{Im\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)} Im\left(\frac{1}{Y_{11}}\right) \quad (3)$$

DUT의 Z-파라미터에서 위 식으로 계산한 직렬 저항값을 제거하여, 내부소자의 Z-파라미터를 구하였다. 내부소자의 등가 모델 변수는 내부소자의 Y-파라미터와 등가회로의 소자들을 회로망 이론에 의해 구하였다. 이와 같이 구해진 $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ 의 에미터 크기를 갖는 소자 ($I_c=10\text{mA}$, $V_{ce}=3\text{V}$)의 등가모델 파라미터는 표 2와 같다. 또한 그림 3은 최적화(fitting)을 수행하지 않은 직접 추출된 파라미터만을 갖는 등가회로의 S-파라미터와 측정된 S-파라미터를 비교하며, 측정치와 동일한 경향을 보여주고 있다. 본 연구에서 추출된 모델 파라미터는 저주파 하이브리드- π 등가모델을 근간으로 하고 있으며, 고주파 특성을 지원할 수 있는 베이스 분포저항(R_{bb})과, 베이스-컬렉터 커패시터(C_{bc})가 포함된 고주파 하이브리드- π 모델의 최적화 초기 치로 사용되어 잘 일치하는 결과를 보였다.

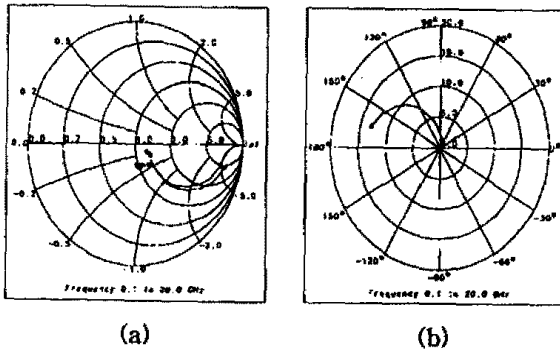


그림 3. HP 8510C로부터 측정된 S-파라미터 (□)와 고주파 등가회로로부터 시뮬레이션된 S-파라미터(○)의 궤적을 도시한 스미스 차트: (a) S_{11} , (b) S_{21} .

IV. 전력 측정

HBT 소자의 전력측정을 위해 로드-풀 방법을 이용하였다^{[8],[9]}. 로드-풀 방법을 이용하여 등 전력 곡선을 시뮬레이션하여 그림 4에 도시하였다. 입력 출력이 1dBm일때, 로드-풀 방법을 이용하여 최대 13dBm의 출력을 얻을 수 있었다. 제작된 HBT의 전력 특성을 측정하기 위해 입력단과 출력단의 로드-풀을 위해 튜너를 설치하였고, 반사 전력의 제거를 위해 Isolator를 설치하였다. 입력단의 Sweep Generator를 사용하여 전력을 증가시키며, 출력되는 전력을 파워미터로 측정하였다. 먼저 500ohm 정합된 파워에서 튜너를 조절하여 출력단을 부정합(mismatch)시키며 출력을 측정하였다. $Z_L = 47.37 + j20.05 \text{ Ohm}$ 일때 최대 전력이 측정되었으며, 출력 특성을 그림 5에 도시하였다. 측정결과는 그림 4에 도시한 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 표 2에 측정된 소자의 특성을 도시한 바와 같이 소자 크기가 작아질수록 DC 이득은 감소하지만, 전력이득 및 효율은 증가함을 보인다. 2.4GHz에서 수행한 최대 출력은 #0614의 경우 13dBm, #1224는 16dBm을 얻었으며, 효율(Power added efficiency)은 각각 27, 23%를 얻었다. X-밴드에서의 전력 특성을 시뮬레이션하여 그림 7에 도시하였다. 입력 전력이 1dBm일때, 5dBm의 출력을 얻었다.

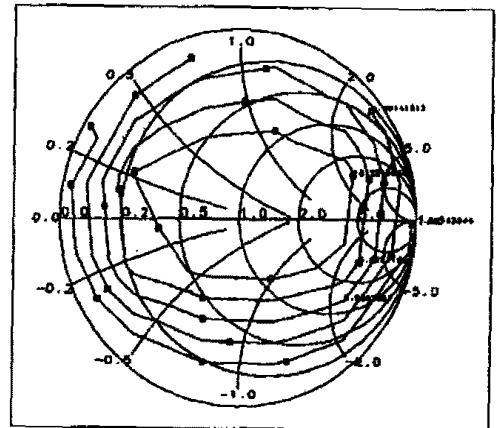


그림 5. 로드-풀 시뮬레이션

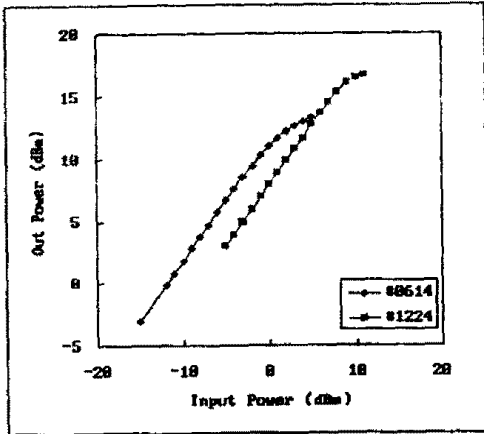


그림 6. 제작된 HBT의 출력 전력 측정 결과 ($6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 소자의 P_{1dB} 는 13dBm, $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ 소자의 P_{1dB} 는 16dBm)

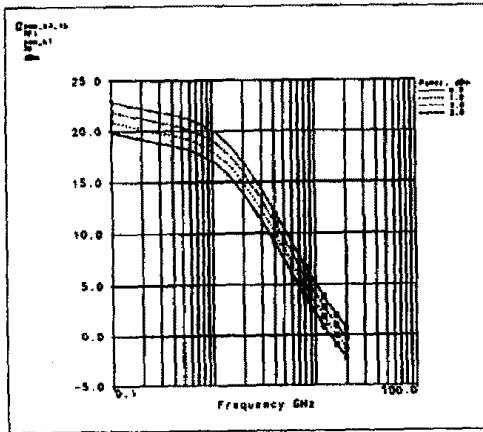


그림 7. 주파수 변화에 따른 출력 전력의 전력 특성 시물레이션

표 1. 추출된 HBT의 고주파 등가회로 파라미터

$R_{b,con}$	22 Ω	C_{bc}	155 fF
R_b	87 Ω	C_c	89 fF
R_c	38 Ω	g_{mo}	0.45 S
R_e	3.77 Ω	τ	4 ps
C_r	2 pF	r_o	$1 \times 10^6 \Omega$
R_r	251 Ω		

표 2. 제작된 HBT소자의 전력 특성 ($f_0=2.4$ GHz)

Emitter Size (μm^2)	12 x 24	6 x 14
DC Gain	80	40
Power Gain (dB)	7	10
G_{max} (dB)	8	12
$P_{out}(P_{1dB})$ (dBm)	16	13
Power (mW)	40	20
PAE (%)	23	27

V. 결론

본 연구에서는 X-밴드 응용을 위한 AlGaAs/GaAs HBT를 제작, DC 및 RF 동작 특성을 측정하고, 소자의 등가모델 변수를 추출하였다. 또한 최대 전력 효율을 얻기 위해 로드-풀 방법(load-pull method)을 이용하여 HBT 소자의 전력 특성을 고찰하였다. 본 연구에서 제작한 AlGaAs/GaAs HBT는 $6 \times 14 \mu\text{m}^2$ 의 에미터 크기에서 최대 전류 이득은 45, 항복전압은 10V, f_T (차단주파수)는 30GHz, f_{max} (최대 공진 주파수)는 17GHz를 얻었다. X-밴드에서 AC 전류 이득은 7dB, MAG는 3.5dB를 얻었다. 제작된 소자의 S-파라미터를 측정하여 소신호 등가모델 파라미터를 추출하였다. 로드-풀 방법을 이용하여 HBT 소자의 전력 특성을 측정하였다. 출력단을 부정합(mismatch)시키며 출력을 측정하여 $Z_L = 47.37 + j20.05 \text{ Ohm}$ 일때 단위 소자에서 최대 출력 13dBm, 효율(Power added efficiency)은 27%를 얻었다.

본 연구는 인하대학교 자체연구비, 학술진흥재단 반도체분야공모과제, 과학재단 특정연구 및 국방과학연구소 장기기초연구의 지원으로 수행되었음.

VI. 참고 문헌

- [1] M. Salib, et al., "A 1.8W, 6-18 GHz HBT MMIC Power Amplifier with 10 dB Gain and 37% Peak Power Added Efficiency," IEEE Microwave and Guided Wave Lett., Vol. 3, No. 9, September 1993, pp. 325-326.
- [2] F. Ali, et al., "A 25 Ohm, 2W, 8-14 GHz HBT Power MMIC with 20 dB Gain and 40% Power-Added Efficiency," 1994 IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium Digest, May 1994, pp. 113-115.

- [3] M. Khatibzadeh, et al., "12W Monolithic X-band HBT Power Amplifier," IEEE 1992 Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium Digest, June 1992, pp. 47-50.
- [4] T. Won and H. Morkoc, "Heterojunction bipolar transistors for milimeter wave and optoelectronic applications," 1988 IEEE Princeton Section Sarnoff Symposium, Sep. 30, 1988.
- [5] A. S. Bhansali, V. Murali, L. McVay, and R. Shukla, "An advanced multilevel interconnect scheme utilizing polyimide as an ILD," 1992 VMIC Conference, pp.44-50, June 9-10 1992.
- [6] D. Costa et al, "A new direct method for determining the heterojunction bipolar transistor equivalent circuit model," BCTM, p.118 1990.
- [7] Der-woei Wu, D.L. Miller "Unique Determination of AlGaAs/GaAs HBT's Small-Signal Equivalent Circuit Parameters" GaAs IC Symposium 1993, pp.259-262.
- [8] Fazal Ali, Aditya Gupta "HEMTs and HBTs" 1991 Artech House, pp. 224-234
- [9] P. Bouysse, et al., "A Novel, Accurate Load-Pull Setup Allowing the Characterization of Highly Mismatched Power Transistors," IEEE Trans. MTT., Vol. 42, No. 42, February, 1994, pp. 327-332.