

논문 2008-45SD-4-1

# MHEMT를 이용한 광대역 특성의 밀리미터파 Cascode 증폭기 연구

(Research on Broadband Millimeter-wave Cascode Amplifier using MHEMT)

백 용 현\*, 이 상 진\*, 백 태 종\*, 최 석 규\*, 윤 진 섭\*\*\*, 이 진 구\*\*

(Yong-Hyun Baek, Sang-Jin Lee, Tae-Jong Baek, Seok-Gyu Choi, Jin-Seob Yoon,  
and Jin-Koo Rhee)

## 요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 광대역 특성을 갖는 MHEMT (Metamorphic High Electron Mobility Transistor) cascode 증폭기를 설계 및 제작하였다. Cascode 증폭기 제작을 위해 먼저  $0.1 \mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT를 설계 및 제작하였다. 제작된 MHEMT는 드레인 전류 밀도가  $670 \text{ mA/mm}$ 이고, 최대 전달컨덕턴스(gm)는  $688 \text{ mS/mm}$ 이며, 주파수 특성으로 전류이득 차단 주파수( $f_T$ )는  $139 \text{ GHz}$ , 최대 공진 주파수( $f_{\text{max}}$ )는  $266 \text{ GHz}$ 의 특성을 나타내었다. 설계된 cascode 증폭기는 회로의 발진을 막기 위해서 저항과 캐패시터를 common gate 소자의 드레인에 병렬로 연결하였다. Cascode 증폭기는 CPW (Coplanar Waveguide) 전송선로를 이용하여 광대역 특성을 얻을 수 있도록 정합회로를 설계하였다. 설계된 증폭기는 본 실험실에서 개발된 MHEMT MMIC 공정을 이용해 제작되었다. 제작된 cascode 증폭기의 측정결과, 3 dB 대역폭이  $20.76 \sim 71.13 \text{ GHz}$ 로  $50.37 \text{ GHz}$ 의 넓은 대역 특성을 얻었으며, 대역내에서 평균  $7.07 \text{ dB}$  및  $30 \text{ GHz}$ 에서 최대  $10.3 \text{ dB}$ 의 S21 이득 특성을 나타내었다.

## Abstract

In this paper, millimeter-wave broadband MHEMT (Metamorphic High Electron Mobility Transistor) cascode amplifiers were designed and fabricated. The  $0.1 \mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT was fabricated for cascode amplifiers. The DC characteristics of MHEMT are  $670 \text{ mA/mm}$  of drain current density,  $688 \text{ mS/mm}$  of maximum transconductance. The current gain cut-off frequency( $f_T$ ) is  $139 \text{ GHz}$  and the maximum oscillation frequency( $f_{\text{max}}$ ) is  $266 \text{ GHz}$ . To prevent oscillation of the designed cascode amplifiers, a parallel resistor and capacitor were connected to the drain of common gate device. By using the CPW (Coplanar Waveguide) transmission line, the cascode amplifier was designed and matched for the broadband characteristics. The designed amplifier was fabricated by the MHEMT MMIC process that was developed through this research. As the results of measurement, the amplifier was obtained 3 dB bandwidth of  $50.37 \text{ GHz}$  between  $20.76$  to  $71.13 \text{ GHz}$ . Also, this amplifier represents the S21 gain with the average  $7.07 \text{ dB}$  gain in bandwidth and the maximum gain of  $10.3 \text{ dB}$  at  $30 \text{ GHz}$ .

**Keywords :** CPW, Cascode, Metamorphic HEMT, Millimeter-wave

## I. 서 론

최근 무선 통신 산업의 발전으로 사용 주파수가 계속

증가하게 되고, 광대역 수요가 증가함으로 인해서 기존의 마이크로파 대역 이상의 주파수에서 동작할 수 있는 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존에는

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터

(Millimeter-wave INnovation Technology research center, MINT)

\*\*\* 정회원, 서울대학 컴퓨터전자과 (Department of computer aided system, Seoul College)

※ 본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(R11-1999-058-02005-0)

접수일자: 2007년8월20일, 수정완료일: 2008년4월1일

일반적으로 PHEMT(Pseudomorphic HEMT)가 사용되지만 높은 주파수 동작과 높은 이득 특성을 만족하기 위하여 전자 밀도나 이동도가 우수하여 고속 동작이 가능한 InP 기반의 HEMT가 사용되어 왔다. 그러나 InP의 경우 매우 고가이며 공정 중에 깨지기 쉬운 단점이 있어, 최근에는 밀리미터파 특성과 낮은 공정 단가를 만족시킬 수 있고, 기존의 GaAs 기판위에 성장시킬 수 있는 MHEMT가 최근 활발히 연구되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 또한 밀리미터파 대역에서 고이득 특성을 얻기 위한 방법으로 일반적인 common-source 구조의 증폭기가 갖는 한계인 밀러 효과의 영향을 줄여줌으로써 고주파 응답을 확장하고 이득 특성을 향상시키기 위해 cascode amplifier 구조가 연구되고 있다. 광대역, 고이득, 그리고 고출력 특성을 갖는 밀리미터파 증폭기는 다양한 주파수 대역의 시스템에서 사용될 수 있기 때문에 개발된 부품의 효율성을 높일 수 있다.

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 양호한 이득 및 광대역 특성을 갖는 증폭기를 개발하기 위해 MHEMT를 이용하여 cascode 증폭기를 설계 및 제작하였다. cascode 증폭기의 개발을 위해 MHEMT를 설계 및 제작하였으며, 회로 설계를 위한 CPW 및 수동소자 라이브러리를 구축한 후 이를 이용하여 cascode 증폭기를 설계하고 제작하였다.

### II. MHEMT의 설계 및 제작

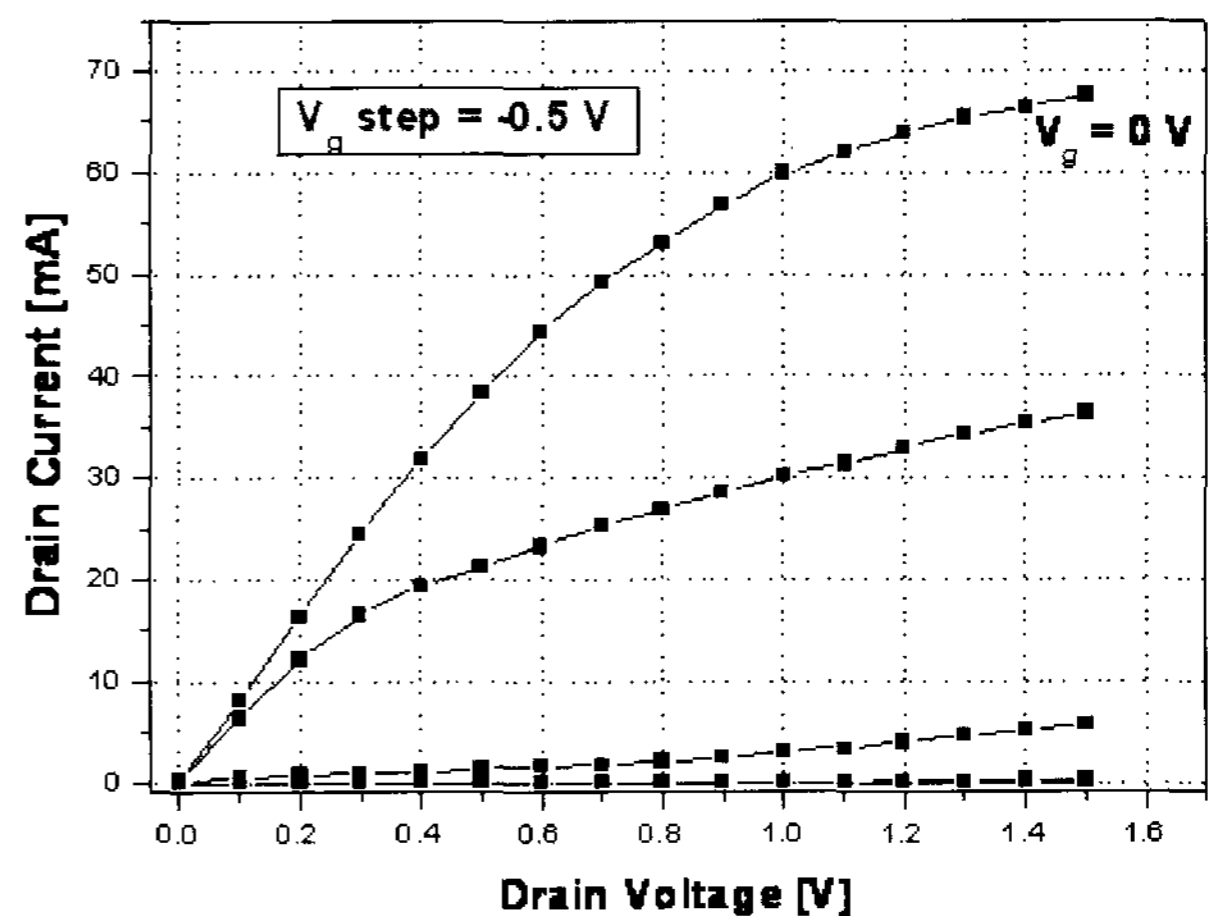
그림 1에 cascode 증폭기 설계에 사용된 MHEMT의 에피층 구조를 나타내었다. 버퍼층은 In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As 층을 0에서 50%까지 In의 몰분율을 변화시키며 S.I. GaAs 기판위에 1 μm의 두께로 성장시켰다. 또한 400 nm 두께

In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	6 x 10 <sup>18</sup> cm <sup>-2</sup>	15 nm
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	undoped	15 nm
δ-doping	4.5x10 <sup>12</sup> cm <sup>-2</sup>	
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	undoped	3 nm
In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	undoped	23 nm
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	undoped	4 nm
δ-doping	1.3x10 <sup>12</sup> cm <sup>-2</sup>	
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	undoped	400 nm
In <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> As (x = 0~0.5)	undoped	1000 nm
S.I. GaAs substrate		

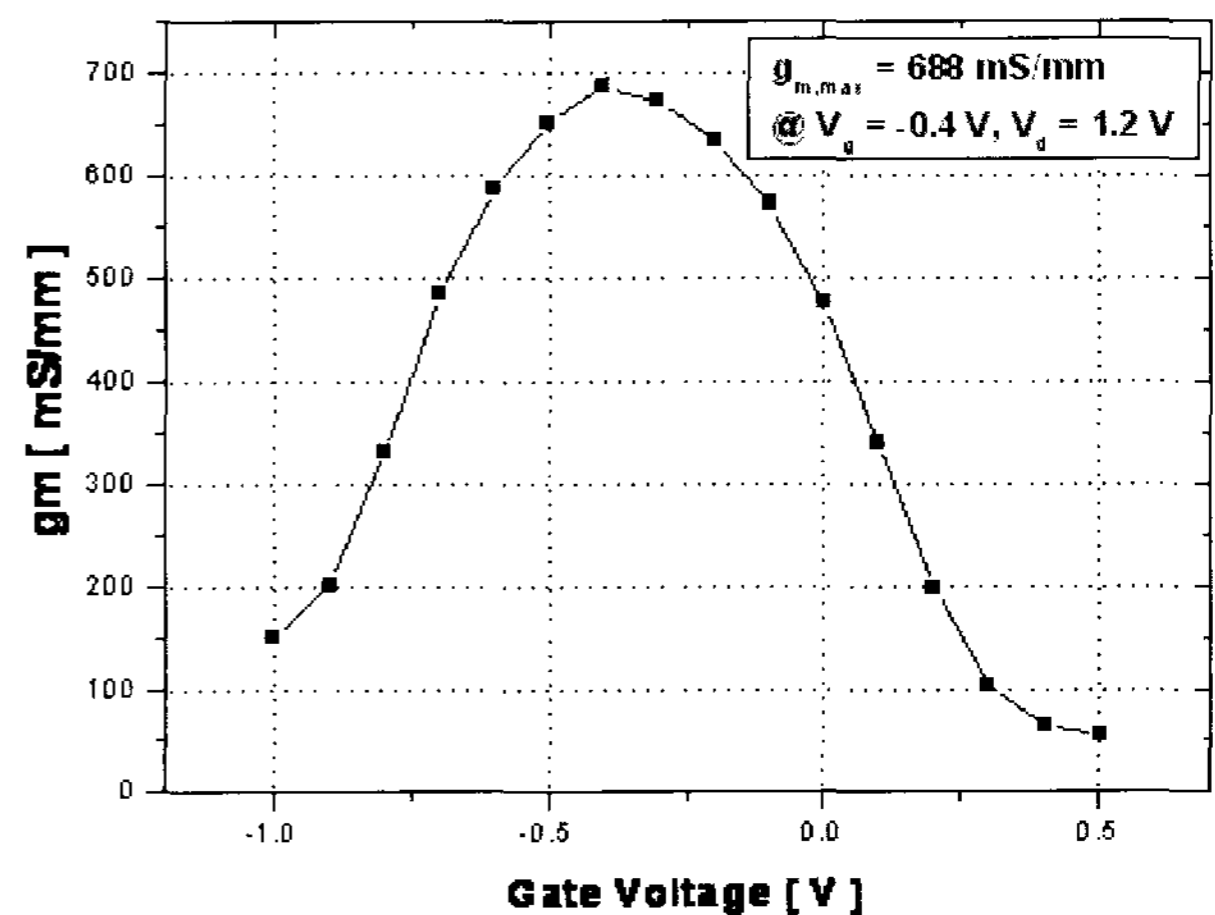
그림 1. MHEMT 소자의 에피 구조  
Fig. 1. The Epitaxial structure of the MHEMT device.

의 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 버퍼를 활성층을 보호하기 위하여 성장시켰다. 버퍼층 위에 활성층은 23 nm 두께의 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 채널층과 Si이 각각 4.5×10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>와 1.3×10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>의 농도로 도핑된 double δ-doping층으로 구성되어 있으며, 15 nm 두께의 n<sup>+</sup> In<sub>0.52</sub>Ga<sub>0.47</sub>As Cap 레이어를 소스-드레인 간의 오믹 접촉을 위해 성장시켰다. 성장된 에피층은 측정결과 300K에서 3.4×10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>의 electron carrier density와 9700 cm<sup>2</sup>/V·sec의 Hall mobility를 나타내었다.

성장된 에피 웨이퍼를 이용하여 0.1 μm Γ-gate MHEMT를 다음과 같은 순서로 제작하였다. 먼저 전기적인 격리를 위해서 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1:1:60)의 식각용액을 이용하여 200 nm의 두께를 식각하였다. 그리고 소스-드레인 간의 오믹 접촉 형성을 위해서 AuGe/Ni/Au



(a)



(b)

그림 2. MHEMT의 DC 특성 측정 결과:  
(a) IV 특성, (b) 전달컨덕턴스

Fig. 2. Measured results of the fabricated MHEMT:  
(a) IV characteristics, (b) Transconductance.

(140/30/170 nm) 금속을 증착하고, RTA (Rapid Thermal Annealing)에서 320 °C로 60초 동안 열처리 하였다. E-beam을 이용하여  $\Gamma$ -gate의 형태의 레지스트 패턴을 형성하고, 리세스(Recess) 식각을 위해서 succinic acid/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1:5:10) 용액을 이용하여 recess를 진행하고, Ti/Au (50/400 nm)를 증착하였다. 게이트 공정 후에 노출된 소자 채널을 보호하기 위해서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivation을 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 진행하였다. Passivation된 각각의 소자들에서 측정을 위한 패드 부분의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 제거하기 위해서 ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)를 이용하여 건식 식각 공정을 진행하였다. 제작된 MHEMT의 DC 특성을 그림 2에 나타내었다. 그림에 나타난 측정 결과는 단위 게이트 폭이 50  $\mu$ m이고, 핑거 수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 핀치 오프 전압은 -1.2 V, 포화전류는  $V_{gs} = 0$  V에서 67 mA로 드레인 전류 밀도는 670 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스는 688 mS/mm를 얻었다.

S-parameter 특성은 Anritsu사의 ME7808A Vector Network Analyzer를 이용하여 0.1~50 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 그림 3은 50  $\mu$ m  $\times$  2 핑거인 MHEMT의 RF 특성으로, 전류이득 차단주파수( $f_T$ )는 139 GHz, 최대공진 주파수( $f_{max}$ )는 266 GHz의 우수한 특성을 나타내었다.

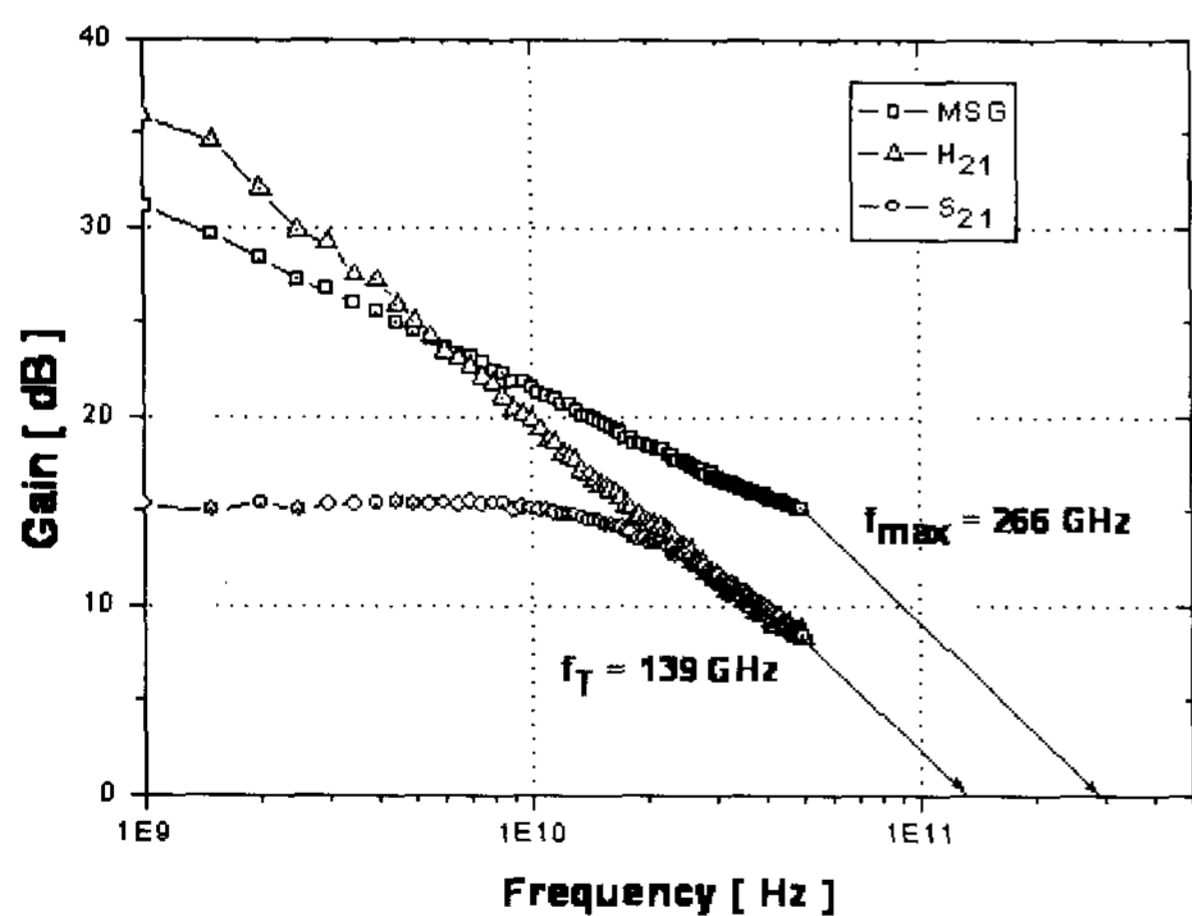


그림 3. MHEMT의 RF 특성  
Fig. 3. The RF characteristics of a MHEMT.

### III. Cascode 증폭기의 설계

증폭기 설계에서 common-source 구조는 회로 설계

가 간단하고 저주파에서 높은 이득 특성을 갖는 장점들 때문에 일반적으로 많이 사용된다. 하지만 common-source 구조는 feedback capacitance에 의해서 야기되는 Miller effect로 인하여 전체 캐패시턴스가 증가하게 되어 고주파 응답이 제한을 받게 된다. 이러한 문제점은 common-gate 구조를 사용하면 해결할 수 있으며, common-gate 구조는 내부의 feedback 캐패시턴스 성분이 없기 때문에 전체 캐패시턴스 값이 감소하여 차단 주파수 특성이 향상되게 된다. 그러나 common-gate 구조의 경우에는 common-source 구조에 비해서 gain의 특성이 나쁘다. Cascode 구조는 common-source와 common-gate 구조의 장점들을 결합한 구조로 입력단은 common-source 구조이고, 출력단은 common-gate 로 구성된다. Cascode 구조의 증폭기는 출력단의 FET가 Miller effect가 없기 때문에 차단 주파수 특성이 향상될 뿐만 아니라, 입력단 FET의 Load 저항인 출력단 FET의 source 저항이 일반적으로 작은 값은 갖기 때문에 입력단 FET의 Miller effect가 감소하여 주파수 특성이 향상된다<sup>[4]</sup>. 그리고 기존의 common-source 구조와 다르게 load에 인덕터를 삽입함으로써 증폭기의 대역폭을 증가시키는 shunt peaking 기술을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 조건을 이용하여 밀리미터파 대역에서 고이득 특성을 얻기 위하여 Cascode 구조의 증폭기를 설계하였다.

Cascode 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작 특성을 정확하게 표현하는 모델링 과정이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 MHEMT의 소신호 모델을 추출하는 프로그램을 개발하여 추출하였다<sup>[5]</sup>. 그리고 대신 호 파라미터를 추출하기 위해서 EEHEMT1 (Eesof scalable nonlinear HEMT model)을 사용하였다. 추출된 MHEMT의 대신호 모델은 시뮬레이션 결과값은 측정값과 잘 일치하였다.

Cascode 증폭기의 설계 및 제작을 위한 전송선로 CPW 라인을 사용하기 위해 다양한 CPW 패턴을 설계 및 제작하였다. CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70  $\Omega$ 의 특성 임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 Curve, Tee, Cross의 라이브러리를 구축하였다. 그리고 900 Å의 두께를 갖는 Ti 금속을 사용한 박막저항과 900 Å Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막을 이용한 MIM (Metal Insulator Metal) 캐패시터를 설계 및 제작하여 수동소자 모델을 구축하였다. 증폭기의 증폭단은 cascode 구조로 설계하였으며, cascode 증폭기는 1 단 증폭기 회로를 설계하였다. 증

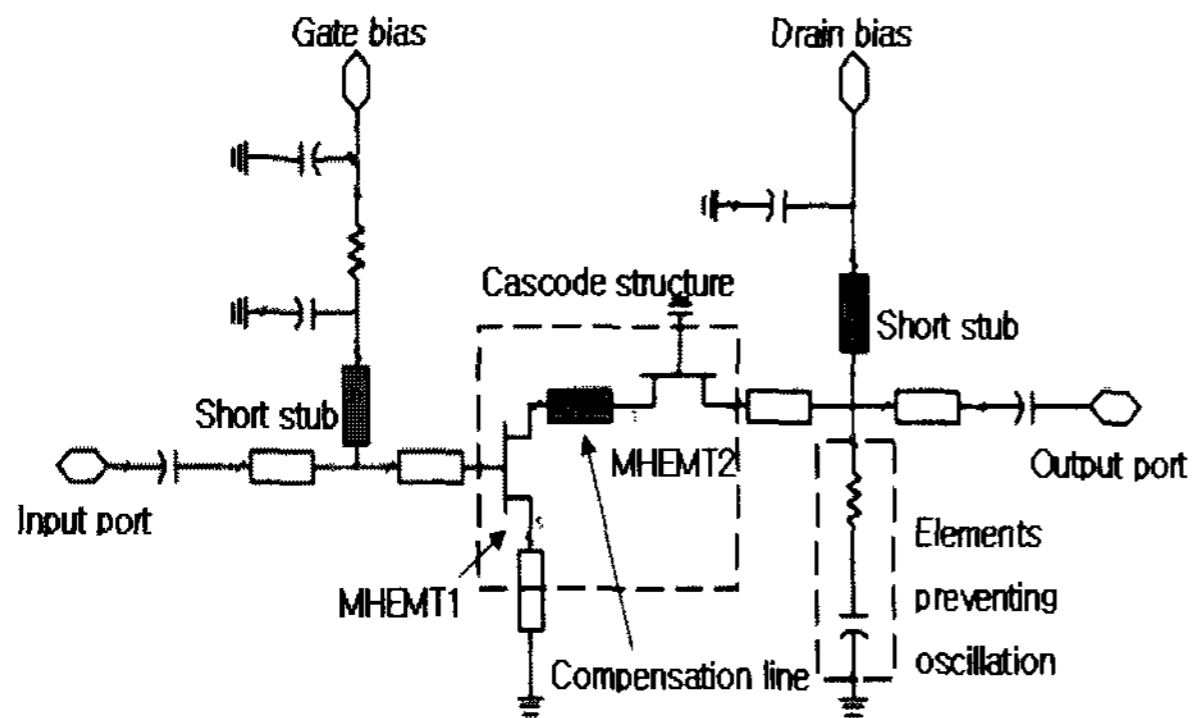


그림 4. Cascode 증폭기 회로도

Fig. 4. The circuit diagram of Cascode amplifier.

폭기의 정합회로를 CPW 라인을 사용하여 설계하였으며, 광대역 특성을 갖도록 shunt peaking 기술을 포함하여 설계하였다. 그리고 회로의 3 dB 대역폭내의  $S_{21}$  이득을 보다 평탄하게 하기 위한 목적으로 보상 전송선로를 삽입하였다. 설계된 전체 회로 패턴은 Momentum 시뮬레이션을 통하여 검증하고 최적화를 수행하였다. 그림 4는 설계된 광대역 Cascode 증폭기의 회로도이다.

#### IV. MMIC 증폭기의 제작 및 측정

밀리미터파 cascode 증폭기는 개발된 CPW 라인과 MHEMT MMIC 공정을 사용하여 제작되었다<sup>[6-7]</sup>. 그림 5는 제작된 cascode 증폭기의 표면사진으로 칩 면적은 각각  $1.2 \times 0.9 \text{ mm}^2$  이다.

제작된 Cascode 광대역 증폭기는 Anritsu사의 ME7808A Vector Network Analyzer를 사용하여 0.5~110 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S-parameter 특성을 측정하였다. 제작된 Cascode 증폭기의 측정결과, 3 dB 대역폭이 20.76~71.13 GHz로 50.37 GHz의 광대역 특성을 얻었으며, 대역내에서 평균 7.07 dB 및 30 GHz에서 최대 10.3 dB의  $S_{21}$  이득을 나

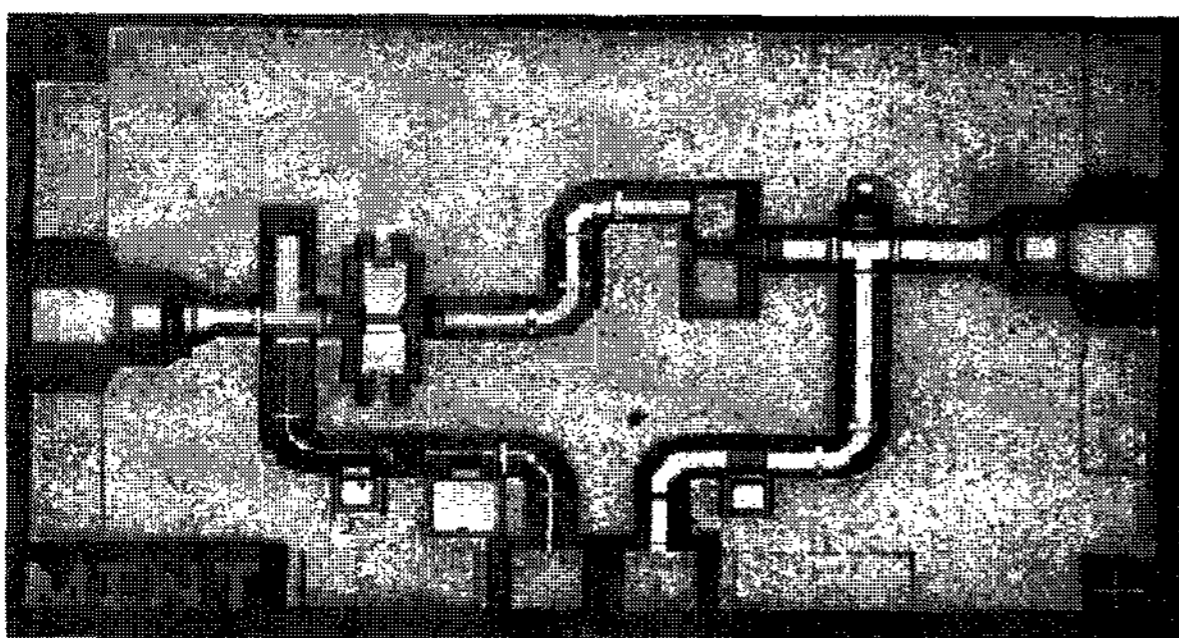


그림 5. 제작된 Cascode 증폭기 사진

Fig. 5. Photograph of the fabricated Cascode amplifier.

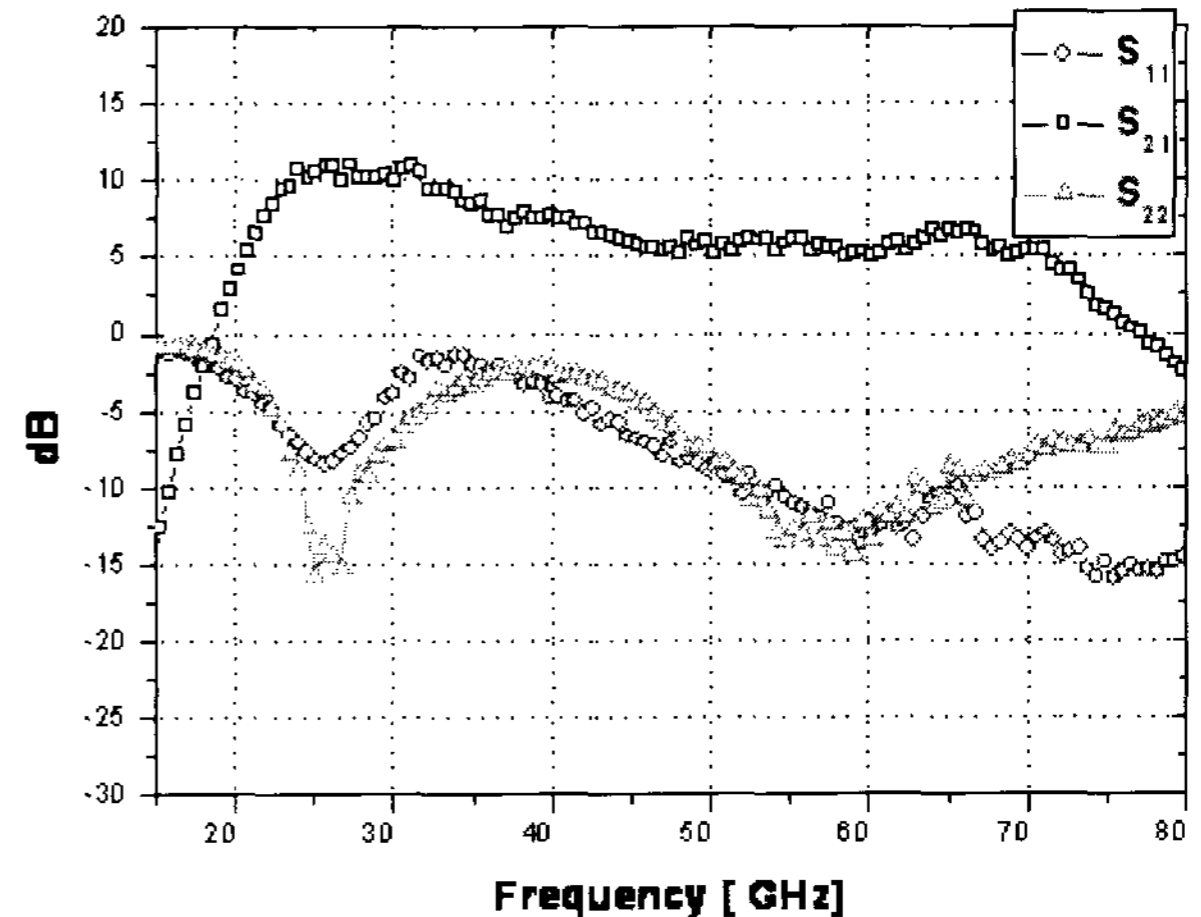


그림 6. cascode 증폭기의 S-parameter 특성

Fig. 6. S-parameter characteristics of the cascode amplifier.

타내었다. 그림 6에 Cascode 증폭기의 S-parameter 측정결과를 나타내었다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 shunt peaking 기술을 접목시킨 밀리미터파 대역에서 양호한 이득과 광대역 특성을 갖는 MHEMT Cascode 증폭기를 설계 및 제작하였다. 밀리미터파 광대역 Cascode 증폭기 제작을 위해  $0.1 \mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT를 설계 및 제작하였다. 제작된 MHEMT는 단위 게이트 폭이  $50 \mu\text{m}$ , 핑거수가 2개이고, 드레인 전류 밀도  $670 \text{ mA/mm}$ , 최대 전달컨덕턴스( $g_m$ )는  $688 \text{ mS/mm}$ 를 얻었으며, 주파수 특성으로  $f_T$ 는 139 GHz,  $f_{\text{max}}$ 는 266 GHz의 우수한 특성을 나타내었다. Cascode 증폭기는 CPW 전송선로를 이용하여 광대역 특성을 얻을 수 있도록 정합회로를 설계하였으며, 회로의 발진을 막기 위해서 저항과 캐패시터를 common-gate 소자의 드레인에 병렬로 연결하였다. 대역폭의 확장 및 gain의 평탄화를 위해 바이어스 회로들에 short stub를 삽입하였고, common-source와 common-gate 소자 사이에 보상 전송선로를 삽입하여 최적화 시켰다. 설계된 증폭기는 MHEMT MMIC 공정을 이용해 제작되었다. 제작된 cascode CPW 증폭기의 측정결과, 3 dB 대역폭이 20.76~71.13 GHz로 50.37 GHz의 대역 특성을 얻었으며, 대역내에서 평균 7.07 dB 및 30 GHz에서 최대 10.3 dB의 이득특성을 보였다. 본 논문에서 설계 및 제작된 MHEMT Cascode 증폭기는 밀리미터파 대역에서 양호한 이득 및 광대역 특성을

나타내었으며, 밀리미터파 대역 시스템에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] D.M. Gill, B.C. Kane, S.P. Svensson, D.W. Tu, P.N. Uppal, and N.E. Byer, "High performance, 0.1  $\mu\text{m}$  InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors on GaAs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 17, pp. 328-330, Jul. 1996.
- [2] S. Bollaert, Y. Cordier, V. Hoel, M. Zaknounge, H. Happy, S. Lepilliet, and A. Cappy, "Metamorphic In<sub>0.4</sub>Al<sub>0.6</sub>As/ In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As HEMTs on GaAs substrate," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 123-125, Mar. 1999.
- [3] J. Y. Shim, H. S. Yoon, S. J. Kim, J. Y. Hong, W. J. Chang, D. M. Kang, J. H. Lee and K. H. Lee, "DC and Microwave Characteristics of 0.2  $\mu\text{m}$  T-Gate Double-Doped Metamorphic InAlAs/InGaAs/GaAs HEMTs Recessed with Succinic Acid/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 41, pp. 528-532, Oct. 2002.
- [4] Sedra/Smith, *Microelectronic Circuits*, Oxford.
- [5] D. S. Park, H. C. Cho, Y. S. Chae, J. K. Rhee, "A New Cold PHEMT Equivalent Circuit for Extracting Extrinsic Resistance," *Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices*, pp. 115-119, 2000.
- [6] J. W. Shin, Y. S. Yoon, S. D. Lee, H. C. Park and J. K. Rhee, "Effects of He gas on hydrogen content and passivation of GaAs PHEMT with SiN films," *2000 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD)*, pp. 121-124, 2000.
- [7] Il-Hyeong Lee, Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee, "Studies on Air-Bridge Processes for mm-wave MMIC's Applications," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 35, no. 12, pp. S1043-S1046, 1999.

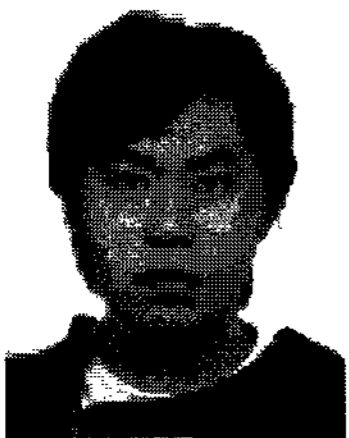
저자 소개



백용현(학생회원)  
 2003년 동국대학교 전자공학과 (공학사)  
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중  
 <주관심분야 : MMIC 설계 및 공정>



이상진(학생회원)  
 2003년 중부대학교 정보통신공학과(공학사)  
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중  
 <주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계, MMIC를 이용한 통신 모듈설계, Flip chip 기술을 이용한 패키징>



백태중(학생회원)  
 2003년 중부대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2006년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중  
 <주관심분야 : MEMS 공정 설계, E-Beam Lithography, MMIC 부품설계 및 제작>



최석규(학생회원)  
 2004년 국립한경대학교 전자공학과 (공학사)  
 2006년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중  
 <주관심 분야 : MMIC 공정>

윤진섭(정회원)  
 대한전자공학회 논문지  
 제 44권 SD편 제 9 호 참조



이진구(평생회원)  
 1969년 국립항공대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 1975년 서울대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),  
 1982년 Oregon State Univ. 전기공학과(공학박사),  
 1985년 Cray Research Scientist,  
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer,  
 1995년~현재 한국 전자과학회 이사,  
 2005년 대한전자공학회 회장,  
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,  
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장  
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>