

논문 2007-44SD-9-3

Cascode 구조를 이용한 밀리미터파 광대역 평형 증폭기의 연구

(Study on Millimeter-wave Broadband Balanced Amplifiers with
Cascode Configuration)

임 병 옥*, 권 혁 자***, 문 성 운*, 안 단****,
이 문 교*, 이 상 진*, 전 병 철*, 박 현 창*, 이 진 구**

(Byeong-Ok Lim, Hyuk-Ja Kwon, Sung-Woon Moon, Dan An, Mun-Kyo Lee,
Sang-Jin Lee, Byoung-Chul Jun, Hyun-Chang Park, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 cascode 구조에 shunt peaking 기술을 접목시킨 밀리미터파 광대역 단일 종단 증폭기와 tandem 결합기를 이용한 밀리미터파 광대역 평형 증폭기를 설계 및 제작하였다. 증폭기 제작을 위하여 0.1 μm Γ -gate GaAs PHEMT가 사용되었다. 제작된 단일 종단 증폭기는 37 GHz (18.5 ~ 55.5 GHz)의 3 dB 대역폭과 47 GHz에서 9.38 dB의 최대 S_{21} 이득 특성을 얻을 수 있었다. 밀리미터파 대역용 광대역 평형 증폭기 제작을 위해 사용된 tandem 결합기는 30 ~ 60 GHz에서 평균 3.5 dB의 결합 계수 및 -23 dB 이하의 반사 손실을 얻을 수 있었다. 제작된 평형 증폭기는 44.5 GHz (21 ~ 65.5 GHz)의 3 dB 대역폭을 얻었으며, 최대 S_{21} 이득은 60 GHz에서 10.4 dB의 값을 얻을 수 있었다. Tandem 결합기를 이용한 평형 증폭기는 shunt peaking 기술을 이용한 단일 종단 증폭기에 비해 20 % 증가된 3 dB 대역폭을 보였으며, 더 낮은 입력 및 출력 반사 손실을 얻을 수 있었다.

Abstract

We report broadband cascode amplifiers of a single-ended and a balanced amplifier for the millimeter-wave applications. The amplifiers were fabricated using 0.1 μm Γ -gate PHEMT technology on GaAs substrate. The single-ended cascode amplifier was designed and fabricated by using shunt peaking technology. The fabricated single-ended cascode amplifier shows 3 dB bandwidth of 37 GHz (18.5 ~ 55.5 GHz) and the maximum S_{21} gain of 9.38 dB. The balanced cascode amplifier using tandem couplers achieves 3 dB bandwidth and the maximum S_{21} gain of 44.5 GHz (21 ~ 65.5 GHz) and 10.4 dB at 60 GHz, respectively. The 3 dB bandwidth of the balanced cascode amplifier shows 20 % larger than the single-ended cascode amplifier.

Keywords : Millimeter-wave, broadband, cascode amplifier, shunt peaked amplifier, tandem coupler

* 정회원, ** 평생회원, 동국대학교 전자공학과 밀리미터파 신기술 연구센터
(MINT, Millimeter-wave INnovation Technology research center)

*** 정회원, 삼성탈레스
(Sam-sung Thales)

**** 정회원, 국방기술품질원

(DTaQ, Defense agency for Technology and Quality)

※ 본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음 (R11-1999-058-04003-0)
접수일자: 2007년4월21일, 수정완료일: 2007년8월17일

I. 서론

최근 위성통신, 밀리미터 레이더 등 밀리미터파 대역의 활용은 점차 확대되어 가고 있다. 특히 광대역, 고이득, 그리고 고 출력의 특성을 나타내는 밀리미터파 증폭기는 다양한 주파수 대역의 시스템에서 사용될 수 있기 때문에 개발된 부품의 효율성을 높일 수 있으며, 군사용뿐 아니라 상업적인 응용에 중요한 부품이다. 또한, 이동통신을 포함한 무선통신 서비스의 대중화 보급으로 기존의 통신망에서 제공 되는 각종고속 통신 서비스의 무선화 및 초고속 대용량의 광대역 무선 멀티미디어 서비스가 요구되고 있으며, 이에 따라 넓은 대역에서 동작이 가능한 광대역 증폭기의 필요성 역시 증가되고 있다^{1~2)}.

일반적으로 cascode 구조는 중간 대역 이득의 감소를 피하면서 밀러 증대 효과를 감소시켜 차단 주파수를 확장 시키는 특성을 갖고 있어 광대역 증폭기를 구현하는 회로에 많이 사용 된다.

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 광대역 특성을 갖는 cascode 증폭기를 개발하기 위해 shunt peaking 기술과 tandem 결합기를 사용하였다. 증폭기 제작을 위해 0.1 um 게이트 길이 PHEMT (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)를 사용하였으며, tandem 결합기는 기존의 MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrate Circuit) 공정의 CPW (CoPlanarWaveguide) 및 에어브리지 공정을 사용하여 제작하였다.

II. Cascode Amplifier의 설계

일반적으로 공통-소스 구조는 회로 설계가 간단하고 저주파에서 높은 이득 특성을 나타내어 증폭기 설계에 많이 사용되어 진다. 그러나 공통-소스 구조에서는 밀러 증대 효과, 즉 귀환 커패시턴스에 의해 전체 커패시턴스가 증가함에 따라 회로의 고주파 응답을 제한시키는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위하여 그림 1 과 같이, 공통-소스 구조에서의 드레인 단과 공통-게이트 구조에서의 게이트 단을 연결시키는 cascode 구조를 많이 사용하게 된다. Cascode 회로에서, HEMT 1의 드레인 전류는 공통-게이트 구성인 HEMT 2의 소스단으로 공급된다. 따라서 HEMT 1의 부하 저항은 HEMT 2의 R_s 이며, 일반적으로 작은 값을 나타낸다. 이 작은 값의 부하저항은 밀러 증대 효과를 상당히 줄임으로써 고주파 응답을 확장시키게 된다. 또한, HEMT 2의 드레

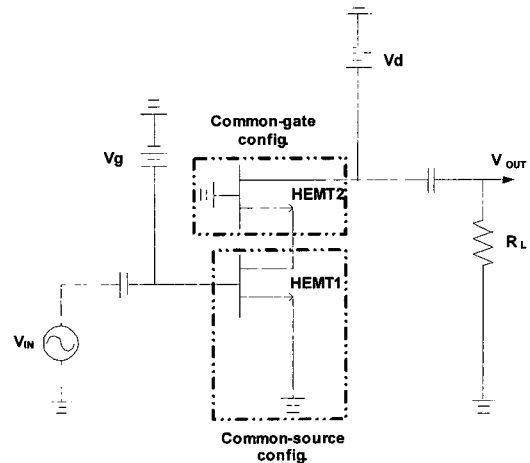


그림 1. 광대역 cascode 증폭기의 회로도
Fig. 1. The circuit of the broadband cascode amplifier.

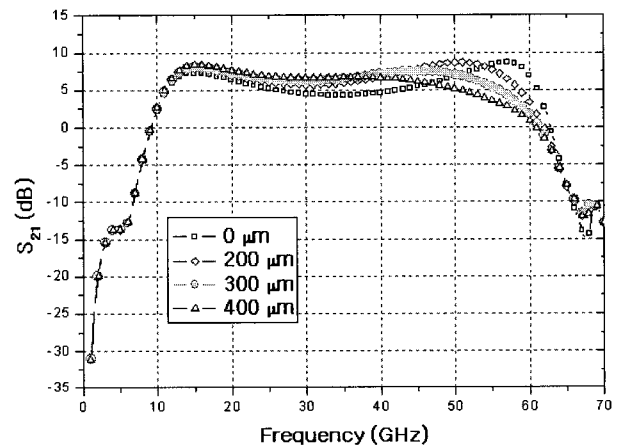


그림 2. 보상 전송선로의 길이 변화에 따른 시뮬레이션된 S₂₁ 이득 특성
Fig. 2. The simulated S₂₁ gain characteristics versus frequency for different compensation transmission line lengths.

인 전류는 HEMT 1의 드레인 전류와 거의 같은 전류를 운반하기 때문에, 중간 대역 이득을 감소시키지 않게 되는 것이다^{3~4)}.

밀리미터파 광대역 증폭기 제작을 위해 cascode 구조에 shunt peaking 기술을 사용하여 설계하였다. Shunt peaking 기술은 공통-소스 증폭기의 load에 인덕터를 삽입함으로써 더 넓은 주파수 범위에서 일정한 이득을 갖도록 하는 것으로, 이는 증폭기 대역폭의 확장 및 이득의 평탄화를 증가 시킬 수 있다. 광대역 cascode 증폭기는 회로의 발전을 막기 위해서 저항과 캐패시터를 공통-게이트 소자의 드레인에 병렬로 연결하였다. 또한, 대역폭의 확장 및 이득의 평탄화를 위한 입력 및 출력 단의 병렬 인덕터는 인덕터와 캐패시터로 모델화 될 수 있는 전송선로를 사용하였다. 바이어

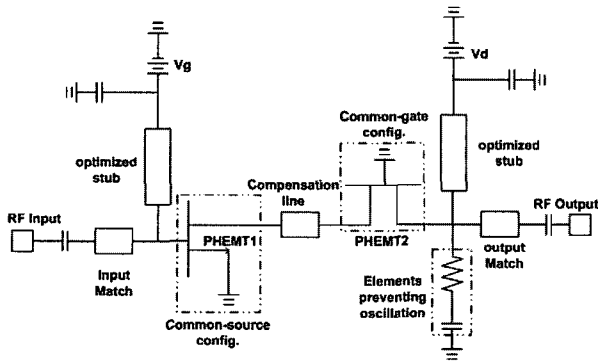


그림 3. Shunt peaking 기술을 이용하여 설계된 광대역 cascode 단일 종단 증폭기의 회로도
 Fig. 3. The circuit of the broadband cascode amplifier using shunt peaking technology.

스 회로들에 short stub 및 공통-소스 소자와 공통-게이트 소자 사이에 보상 전송선로를 삽입하여 구현하였다. 이 보상 전송선로는 귀환 인덕턴스를 가짐으로써 입력 및 출력 단 동시에 인덕턴스를 제공한다.

Cascode 증폭기는 광대역 및 평탄화 특성을 나타내는 적절한 인덕턴스를 갖도록 하기 위해 short stub와 보상 전송선로의 길이가 최적화되었다. 광대역, 평탄화, 그리고 발진을 고려하여 바이어스 단의 short stub의 길이는 790 μm 로 선택하였다.

보상 전송선로의 삽입은 3 dB 대역폭내의 S_{21} 이득을 상당히 평탄화 시킬 수 있다. 그림 2는 보상 전송선로의 길이에 따른 증폭기의 시뮬레이션 특성을 보여주고 있다. 보상 전송선로가 없을 때, 15~53.5 GHz 주파수 범위에서 4.3~8 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었다. S_{21} 이득의 평탄화를 위해서 보상 전송선로의 길이는 300 μm 로 최적화 되었으며, 15~53.5 GHz 주파수 범위에서 6.4 ~ 8 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었다. 입출력 단은 광대역 특성을 갖는 정합회로로 설계하였으며, 설계된 전체 회로 패턴은 Agilent사 ADS의 MomentumTM 시뮬레이션을 통하여 최적화를 수행하였다. 그림 3에 설계된 밀리미터파 광대역 cascode 증폭기의 회로도를 나타내었다.

보상 매칭 회로는 이득의 평탄화를 가져오지만 입력 및 출력 VSWR의 감소를 야기 시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 평형 증폭기 구조를 사용하였으며, 평형 증폭기 구조는 이득의 평탄화와 입력 및 출력 VSWR을 향상 시킬 수 있다^[5]. 3 dB 하이브리드 결합기는 입력과 출력에서 각각 1개가 사용되며, 입력 측 결합기는 전력 분배기 처럼, 출력 측 결합기는 전력 결합기처럼 작동한다. 평형 증폭기 구조에

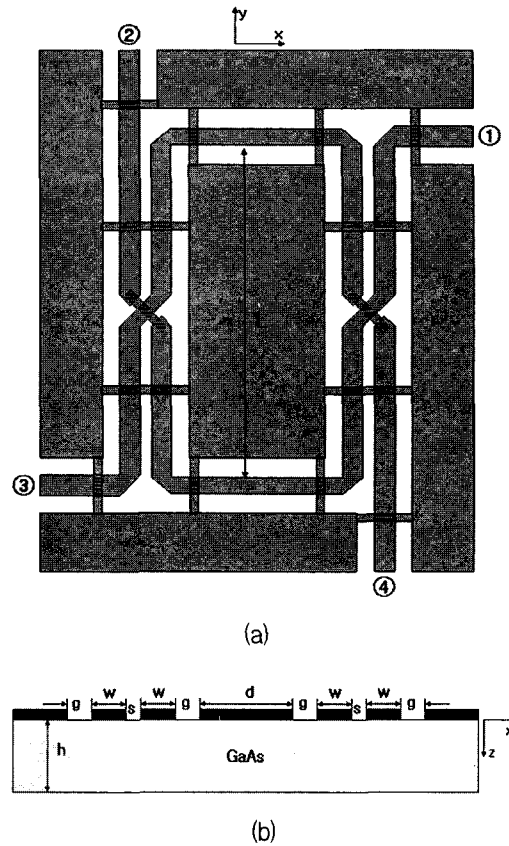


그림 4. CPW tandem 결합기 레이아웃
 (a) 표면도, (b) 측면도

Fig. 4. Layout of CPW tandem coupler.
 (a) Top view, (b) cross-sectional view.

표 1. 설계된 CPW tandem 결합기의 파라미터
 Table 1. Parameters of the CPW tandem coupler.

ϵ_r	12.9
h	680 μm
L	452 μm
d	171 μm
w	26 μm
g	22 μm
s	13 μm

서 사용될 수 있는 Wilkinson 결합기와 branch-line 결합기 등은 그 설계 및 제작이 쉽다는 장점이 있지만, 3 dB 대역 폭이 중심 주파수의 50 %로 제한된다는 단점이 있다. Tandem 결합기는 광대역에 걸쳐 우수한 방향성 및 위상차 특성을 보이고 있으며, 이는 광대역 평형 증폭기의 제작에 용이하다^[5-6]. 그림 4에 밀리미터파 광대역 증폭기에 사용된 tandem 결합기의 회로도 및 단면도를 보여 주고 있다. 그림 4 (a)에서 포트 ①은 입력포트이며, 포트 ②, ③, 그리고 ④는 각각 direct, couple, reflect 포트들을 나타낸다. Tandem 결합기는 3 dB 이상의 결합 계수를 갖기 위해 두 개의 CPW 평형 결합

기를 이용하여 구성하였으며, 각각의 결합기는 중심 주파수 60 GHz에서 약 8 dB의 커플 계수를 갖도록 설계되었다. 그림 4 (b)에서 표현된 모든 변수들은 기판의 두께, h와 유전율, ϵ_r 을 제외한 모든 변수들은 통과 포트간의 크기와 위상차를 계산 한 값을 HFSS로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 변수는 표 1과 같다. 신호선의 교차연결을 위해 사용된 에브리지 방식은 기존의 와이어 본딩 방식에 비해 재연성 및 신뢰도가 높으며, 기존 MIMIC 공정에 쉽게 적용할 수 있다.

밀리미터파 광대역 cascode 평형 증폭기에 사용된 tandem 결합기의 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 측정결과 30에서 90 GHz 사이에서 평균 3.5 dB의 결합 계수를 얻었으며 입력 반사 계수 및 격리도는 각각 -23, -16 dB를 얻었다.

제작된 tandem 결합기와 단일 종단 cascode 증폭기를 이용하여 광대역 평형 증폭기를 설계하여 최적화

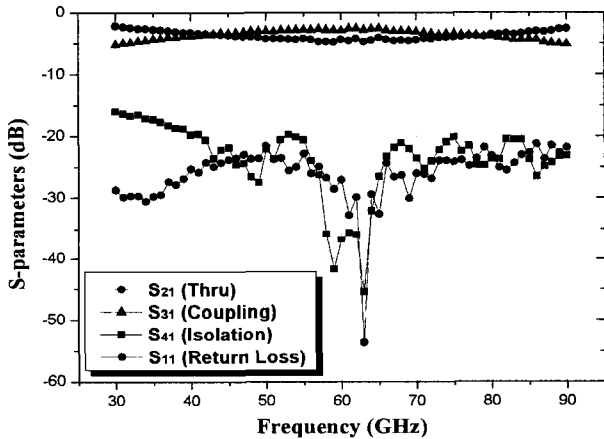


그림 5. CPW tandem 결합기 측정 결과
Fig. 5. Measurement results of CPW tandem coupler.

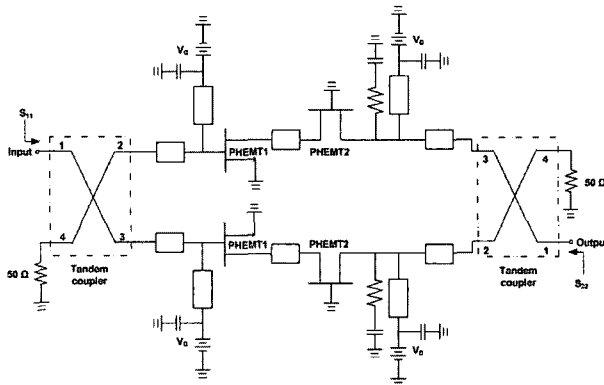


그림 6. Tandem 결합기를 이용하여 설계된 광대역 cascode 평형 증폭기의 최종 회로도
Fig. 6. Circuit of the broadband balanced cascode amplifier with Tandem couplers.

하였다. 그림 6은 tandem 결합기를 이용하여 설계된 밀리미터파 광대역 cascode 평형 증폭기의 회로도를 보여준다.

III. Cascode Amplifier의 제작 및 측정

밀리미터파 광대역 cascode 증폭기의 소자 라이브러리와 제작은 본 논문에서 개발된 MINT (Millimeter-wave INovation technology) 연구 센터의 0.1 μm 게이트 길이 PHEMT 및 MIMIC 라이브러리를 이용하였다^[7-8]. PHEMT의 에피층은 GaAs 기판 위에 AlGaAs/GaAs super lattice 버퍼, InGaAs 채널, 이중 델타 도핑 및 GaAs 캡층으로 구성되었으며, 그림 7에 PHEMT 구조 및 에피층 단면도를 나타내었다. PHEMT 에피구조는 상온에서 $2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 와 $6670 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 의 electron sheet density와 carrier mobility로 측정되었다.

Cascode 증폭기의 제작에 사용된 PHEMT는 게이트 길이 0.1 μm , 게이트 폭이 140 μm ($70 \mu\text{m} \times 2$ 평거)인 구조로 -1.5 V의 편치오프 전압 (V_p), 64.4 mA의 드레인 포화전류 (I_{dss}), 그리고 434 mS/mm의 최대 전달컨덕턴스 (g_m) 특성을 갖는다. PHEMT의 주파수 특성으로 113 GHz의 전류이득차단 주파수 (f_T), 그리고 180 GHz의 최대공진 주파수 (f_{max})를 보였다. Cascode 증폭기는 CPW 전송선로, Ti 저항, MIM (Metal-Insulator-Metal) 캐패시터 및 에어브리지의 수동 소자 라이브러리를 이용하여 제작하였다.

소자 라이브러리를 이용하여 설계된 cascode 증폭기는 MINT 표준 공정을 이용하여 제작되었으며, 제작된 cascode 증폭기들은 400 MHz에서 80 GHz 까지

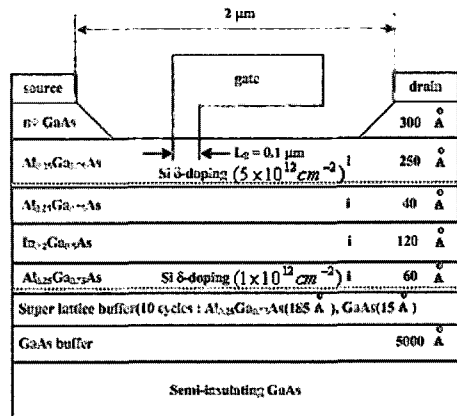
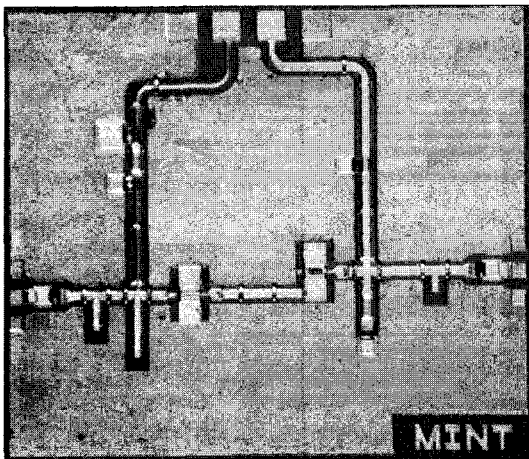
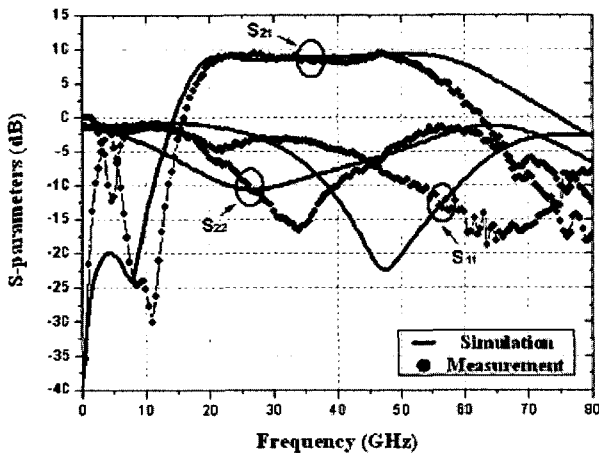


그림 7. 0.1 μm Γ 형 게이트 PHEMT의 에피 구조
Fig. 7. The epi-structure of a PHEMT with 0.1 μm Γ -gate.



(a)

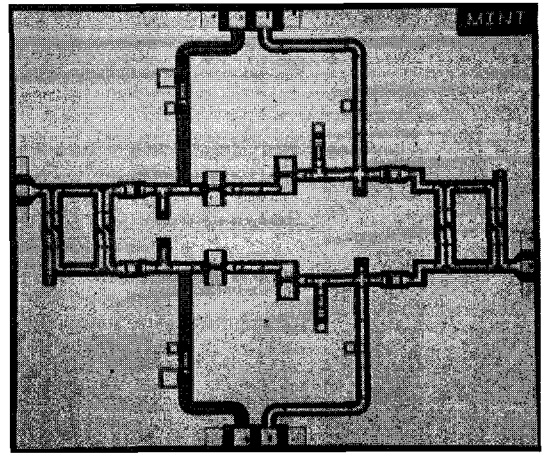


(b)

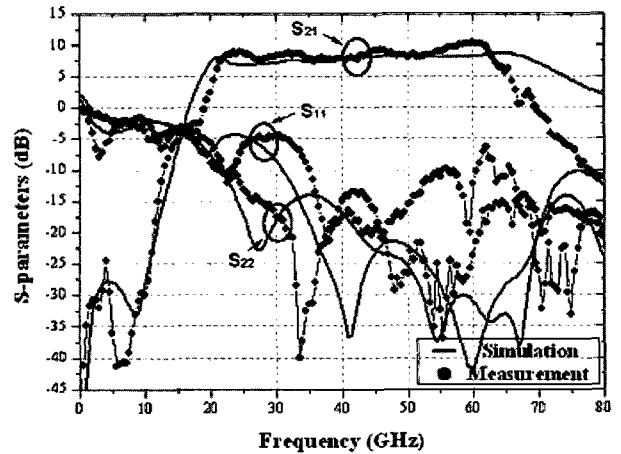
그림 8. 광대역 cascode 단일 종단 증폭기의 제작 결과 (a) 제작된 칩 사진, (b) 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 8. The fabricated results of the broadband cascode single-ended amplifier (a) Photograph (b) Simulated and measured results.

Anritsu ME7808A vector network analyzer를 이용하여 측정되었다. 그림 8 (a)는 제작된 Shunt peaking 기술을 이용한 밀리미터파 광대역 cascode 증폭기의 칩 사진이며, 칩의 크기는 각각 $1.7 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 이다. 측정 결과 20 ~ 51.5 GHz의 주파수 영역에서 8 ~ 9.5 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었다. 3 dB 대역폭은 37 GHz (18.5 ~ 55.5 GHz)로 광 대역 특성을 얻었으며, 3 dB대역 내에서 평균 8.7 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었다. 또한, 47 GHz에서 최대 9.38 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었으며, 입출력 반사 손실은 3 dB 대역폭에서 -3.3에서 -17 dB 이하의 특성을 얻었다. 그림 8 (b)는 광대역 cascode 증폭기의 시뮬레이션 및 측정된 S-parameter 특성을 나타내었다.



(a)



(b)

그림 9. 광대역 cascode 평형 증폭기의 제작 결과 (a) 제작된 칩 사진, (b) 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 9. The fabricated results of the broadband cascode balanced amplifier (a) Photograph (b) Simulated and measured results.

제작된 tandem 결합기를 이용한 밀리미터파 광대역 cascode 평형 증폭기의 칩 사진과 측정 및 시뮬레이션 결과를 그림 9에 보여주고 있다. 제작된 증폭기의 칩의 크기는 각각 $2.8 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 이다. 측정 결과 22~63 GHz의 주파수 영역에서 7.6~10.4 dB의 S_{21} 이득 특성을 나타내었다. 3 dB 대역폭은 44.5 GHz (21~65.5 GHz)로 shunt peaking 기술을 이용한 증폭기보다 넓은 대역폭 특성을 얻었으며, S_{21} 이득은 3 dB대역 내에서 평균 9 dB로 약간 높은 특성을 나타내었다. 최대 S_{21} 이득 특성은 60 GHz에서 10.4 dB의 값을 나타내었으며, 입력 및 출력 반사 손실은 3 dB 대역폭에서 -4.5에서 -35 dB 이하의 특성을 얻어 단일 종단 증폭기 보다 향상된 결과를 얻었다.

Tandem 결합기의 광대역 특성과 낮은 반사 손실 특

성에 의해 tandem 결합기를 이용한 밀리미터파 광대역 cascode 평형 증폭기는 shunt peaking 기술을 이용한 single-ended 증폭기에 비해 약 20%가 증가된 3 dB 대역폭을 얻을 수 있었으며, 낮은 입력 및 출력 반사 손실 특성을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 cascode 구조에 광대역 특성을 얻기 위하여 shunt peaking 기술을 이용한 증폭기와 tandem 결합기를 이용한 평형 증폭기를 제작하였다. Shunt peaking 기술을 이용한 cascode 증폭기는 37 GHz의 3 dB 대역폭을 얻을 수 있었다. Tandem 결합기는 기존 MIMIC 공정의 에어브리지를 이용하여 제작 되었으며, 60 GHz의 2 dB 대역폭, -23 dB의 반사손실 특성을 보였으며, 이를 이용한 평형 증폭기는 44.5 GHz의 3 dB 대역폭을 얻어 shunt peaking 기술을 이용한 단일 종단 구조에 비해 약 20 % 증가된 3 dB 대역폭을 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안된 설계 방법 및 제작된 cascode 증폭기들은 밀리미터파 대역에서 광대역 특성을 증명하였으며, 밀리미터파 대역 시스템 제작에 응용될 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] B. Kane, S. Weinreb, E. Fischer, and N. Byer, "High-sensitivity W-band MMIC radiometer modules," *IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp. Dig.*, pp. 59-62, May 1995.

[2] B. H. Lee, D. An, M. K. Lee, B. O. Lim, S. D. Kim, and J. K. Rhee, "Two-stage broadband high gain W-band amplifier using 0.1-um metamorphic HEMT technology," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 25, pp. 766-768, Dec. 2004.

[3] Sedra/Smith, *Microelectronic Circuits*, 4th ed. Oxford.

[4] Thomas H. Lee, *THE DESIGN OF CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*, Cambridge University Press.

[5] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers, 2nd ed.* Prentice Hall.

[6] 문성운, 한 민, 백태중, 김삼동, 이진구, "Tandem 구조를 이용한 V-band CPW 3-dB 방향성 결합기," 전자공학회 논문지 제 42권 TC편, 제 7호, 479-486쪽, 2005년 7월

[7] B. H. Lee, D. An, M. K. Lee, B. O. Lim, S. D. Kim, and J. K. Rhee, "Two-stage broadband high-gain W-band amplifier using 0.1um metamorphic HEMT technology," *IEEE, Electron Device Letters*, vol. 25, pp. 766-768, 2004.

[8] D. An, B. H. Lee, B. O. Lim, M. K. Lee, S. C. Kim, J. H. Oh, S. D. Kim, H. M. Park, D. H. Shin, and J. K. Rhee, "High switching performance 0.1 um metamorphic HEMTs for low conversion loss 94-GHz resistive mixers," *IEEE, Electron Device Letters*, vol. 26, pp. 707-709, 2005.

저 자 소 개



임 병 옥(정회원)
2000년 국립 한경대학교
전자공학과 (공학사).
2002년 동국대학교
전자공학과 (공학석사)
2002년~현재 동국대학교
전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 밀리미터파 대역용 MIMIC 부품 설계 및 제작>



권 혁 자(정회원)
2005년 동국대학교 전자공학과
(공학사)
2007년 동국대학교 전자공학과
(공학석사)
2007년~현재 삼성 텔레스
주임연구원

<주관심분야 : 밀리미터파 수동소자 및 MMIC 설계>



문 성 운(정회원)
2004년 동국대학교
전자공학과 (공학사),
2006년 동국대학교
전자공학과 (공학석사),
2006년~ 재 동국대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 초고주파회로 및 Radar 시스템 설계>

저 자 소 개



안 단(정회원)
 1998년 동국대학교
 전자공학과 (공학사)
 2000년 동국대학교
 전자공학과 (공학석사)
 2006년 동국대학교
 전자공학과 (공학박사)

2007년~현재 국방기술품질원 선임연구원
 <주관심분야 : MMIC 설계, 밀리미터파 소자 모델링>



이 문 교(정회원)
 1999년 배재대학교
 전자공학과 (공학사)
 2001년 동국대학교
 전자공학과 (공학석사)
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 >



이 상 진(정회원)
 2003년 중부대학교
 정보통신공학과 (공학사)
 2005년 동국대학교
 전자공학과 (공학석사)
 2005년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계, MIMIC를 이용한 통신 모듈설계, Flip chip 기술을 이용한 패키징>



전 병 철(정회원)
 1999년 국립환경대학교
 전자공학과 (공학사)
 2001년 동국대학교
 전자공학과 (공학석사)
 2001년 ~ 2004년 (주)아이티에프
 근무 2004년~현재 동국대학교

밀리미터파 신기술 연구센터(MINT) 근무
 <주관심분야 : 반도체, 통신>



박 현 창(정회원)
 1986년 서울대학교
 전자공학과 (공학사)
 1989년 Cornell University
 전자공학 (공학석사)
 1993년 Cornell University
 전자공학 (공학박사)

1993년~1995년 University of Virginia,
 Research Associate
 1995년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 반도체소자, MMIC, 전자기파 응용>



이 진 구(평생회원)
 1969년 국립항공대학교
 전자공학과 (공학사)
 1975년 서울대학교 전자공학과
 (공학석사)
 1982년 Oregon State Univ.
 전기공학과 (공학박사)

1985년 Cray Research Scientist,
 1985년 Microwave Semiconductors, USA
 Senior Engineer
 1995년~현재 한국전자과학회 이사
 2005년 대한전자공학회 회장
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
 1999년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술연구
 센터 소장
 <주관심분야 : MMIC설계, 소자 모델링>