

논문 2004-41SD-11-4

60 GHz 무선 LAN의 응용을 위한 고이득 저잡음 증폭기에 관한 연구

(Studies on the High-gain Low Noise Amplifier for 60 GHz Wireless Local Area Network)

조창식*, 안단*, 이성대*, 백태종*, 진진만*, 최석규*, 김삼동**, 이진구***

(Chang-Shik Cho, Dan An, Sung-Dae Lee, Tae-Jong Baek, Jin-Man Jin, Seok-Gyu Choi, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee)

요약

본 논문에서는 60 GHz 무선 LAN(wireless local area network) 응용을 위해 0.1 μm Γ -gate pseudomorphic high electron mobility transistor(PHEMT)를 이용하여 V-band용 millimeter-wave monolithic integrated circuit(MIMIC) 저잡음 증폭기를 설계 및 제작하였다. 본 연구에서 개발한 PHEMT의 DC 특성으로 드레인 포화 전류 밀도(I_{dss})는 450 mA/mm, 최대 전달컨덕턴스(g_m, max)는 363.6 mS/mm를 얻었으며, RF 특성으로 전류이득 차단주파수(f_T)는 113 GHz, 최대 공진 주파수(f_{max})는 180 GHz의 성능을 나타내었다. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 개발을 위해 PHEMT의 비선형 모델과 CPW 라이브러리를 구축하였으며, 이를 이용하여 V-band MIMIC 저잡음 증폭기를 설계하였다. 설계된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기는 본 연구에서 개발된 PHEMT 기반의 MIMIC 공정을 이용해 제작되었으며, V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 측정결과, 60 GHz에서 S_{21} 이득은 21.3 dB, 입력반사계수는 -10.6 dB 그리고 62.5 GHz에서 출력반사계수는 -29.7 dB의 특성을 나타내었다. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 잡음지수 측정결과, 60 GHz에서 4.23 dB의 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, millimeter-wave monolithic integrated circuit(MIMIC) low noise amplifier(LNA) for V-band, which is applicable to 60 GHz wireless local area network(WLAN), was fabricated using the high performance 0.1 μm Γ -gate pseudomorphic high electron mobility transistor(PHEMT). The DC characteristics of PHEMT are drain saturation current density(I_{dss}) of 450 mA/mm and maximum transconductance(g_m, max) of 363.6 mS/mm. The RF characteristics were obtained the current gain cut-off frequency(f_T) of 113 GHz and the maximum oscillation frequency(f_{max}) of 180 GHz. V-band MIMIC LNA was designed using active and passive device library, which is composed of 0.1 μm Γ -gate PHEMT and coplanar waveguide(CPW) technology. The designed V-band MIMIC LNA was fabricated using integrated unit processes of active and passive device. The measured results of V-band MIMIC LNA are shown S_{21} gain of 21.3 dB, S_{11} of -10.6 dB at 60 GHz and S_{22} of -29.7 dB at 62.5 GHz. The measured result of V-band MIMIC LNA was shown noise figure (NF) of 4.23 dB at 60 GHz.

Keywords : millimeter-wave monolithic integrated circuit(MIMIC), pseudomorphic high electron mobility transistor(PHEMT), V-band, low noise amplifier(LNA), wireless local area network(WLAN)

I. 서론

무선을 이용한 서비스는 전파수요 급증과 소자기술의 발달 등으로 인해 사용 주파수가 점점 높아지고, 정

보통신의 급격한 발달로 고속 및 대용량의 데이터를 통신할 수 있는 서비스가 요구되고 있다. 그러나 현재 상용화되어 있는 주파수 자원의 고갈과 새로운 광 대역 멀티미디어 서비스 수요의 증가로 인해 주파수 대역이 한계점에 이르고 있는 상태이다. 따라서 주파수의 재사용율이 높고, 광 대역 초고속 무선 전송 시스템을 구현할 수 있는 밀리미터파 대역(30~300 GHz)을 기반으로 하는 서비스 기술이 주목받고 있으며, 그에 따른 제반 기술 개발의 중요성이 증가되고 있다¹⁻²⁾. 특히 V-band

* 학생회원 **정회원 ***평생회원
 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
 (Millimeter-wave INnovation Technology research center, MINT)
 접수일자: 2004년7월19일, 수정완료일: 2004년11월5일

(50~75 GHz)인 60 GHz 대역은 산소분자의 강력한 신호 흡수 특성을 가지고 있어서 초 광대역 통신과 무선 LAN 등에 주로 응용되고 있다^[3].

그러나 밀리미터파 응용 시스템의 상용화에 성공하려면 신뢰성이 있으면서도 가격이 저렴한 밀리미터파 대역의 부품개발이 선행되어야 하며, 또한 이를 집적한 MIMIC의 개발이 필수적이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 PHEMT와 CPW 구조를 이용하여 무선 LAN에 응용할 수 있는 V-band MIMIC 저잡음 증폭기를 제작 및 분석하였다.

II. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 설계

그림 1에 V-band MIMIC 저잡음 증폭기 설계에 사용된 PHEMT의 에피구조를 나타내었다. 오믹 특성의 향상을 위하여 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑농도와 300 Å의 두께로 n+ GaAs 캡층(Cap layer)을 설계하였다.

n+ - GaAs Capping Layer	(Si: $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) \Rightarrow 300 Å
Al _{0.25} Ga _{0.75} As Donor Layer	Undoped \Rightarrow 250 Å
Si Planar doping ($5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$)	
Al _{0.25} Ga _{0.75} As Spacer Layer	Undoped \Rightarrow 45 Å
In _{0.2} Ga _{0.8} As Channel Layer	Undoped \Rightarrow 120 Å
Al _{0.25} Ga _{0.75} As Spacer Layer	Undoped \Rightarrow 60 Å
Si Planar doping ($1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)	
GaAs Super Lattice Buffer Layer(x10)	Undoped \Rightarrow 2000 Å
GaAs Buffer Layer	Undoped \Rightarrow 5000 Å
Semi-insulating GaAs Substrate	

그림 1. PHEMT 에피구조
Fig. 1. Epi-structure of PHEMT.

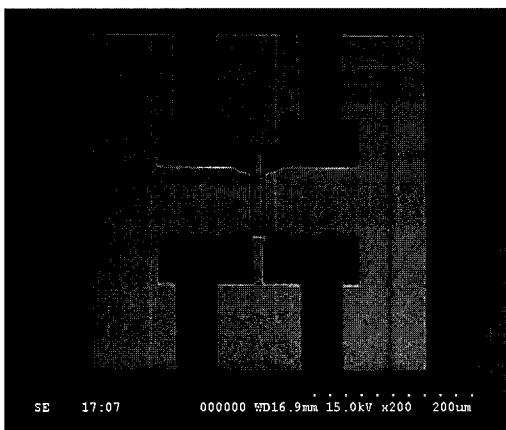
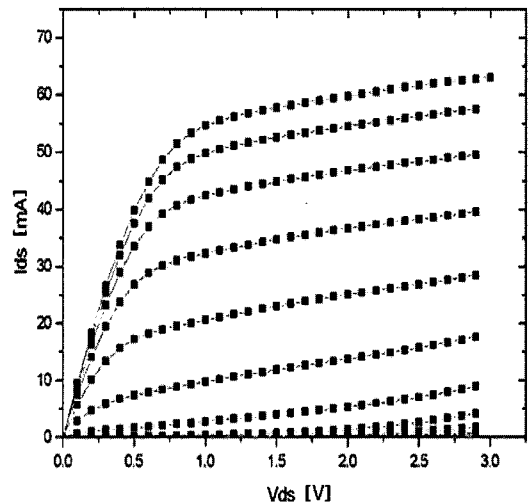


그림 2. 제작된 PHEMT의 SEM 사진
Fig. 2. The SEM photograph of the fabricated PHEMT.

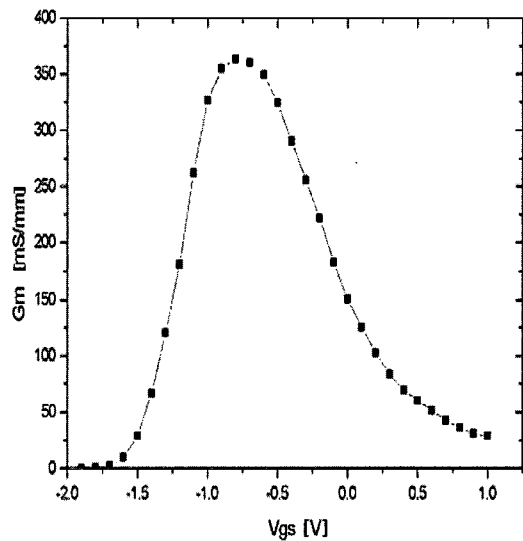
Al_{0.25}Ga_{0.75}As donor

layer는 채널에서의 높은 면전하밀도와 항복전압 특성을 동시에 얻기 위해서 본 논문에서는 Upper spacer layer위와 Lower spacer layer아래에 Si를 각각 $5 \times 10^{21}, 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 로 높게 도핑하는 Si delta doping 구조로 설계하였다^[4].

그림 1의 PHEMT 에피 구조는 상온(room temperature, 300 K)에서 $2.63 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 의 2-DEG sheet carry density 및 $6730 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 의 carrier mobility와 77 K에서 $2.40 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 의 2-DEG sheet carry density 및 $18800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 의 carrier mobility 등의 측정결과를



(a)



(b)

그림 3. PHEMT의 DC 특성 측정 결과 : (a) I-V 특성, (b) 전달컨덕턴스 특성

Fig. 3. DC measured result of PHEMT : (a) I-V characteristics, (b) Transconductance characteristics.

나타내었다.

설계된 에피 구조를 이용하여 V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 능동소자 응용을 위해 0.1 μm Γ -gate PHEMT를 제작하였으며, 그림 2는 제작된 PHEMT의 scanning electron microscope(SEM) 사진을 나타내고 있다.

그림 3은 제작된 0.1 μm Γ -gate PHEMT의 DC 특성을 나타낸 것이다. 단위 게이트 폭이 70 μm 이고 핑거수가 2개인 PHEMT의 전류-전압 및 전달컨덕턴스(g_m) 특성으로 핀치 오프 전압(V_p)은 -1.75 V, 드레인 포화전류 (I_{dss})는 63 mA로 450 mA/mm의 전류 밀도 및 363.6 mS/mm의 최대 전달컨덕턴스($g_{m, max}$)를 나타내었다.

그림 4는 제작된 0.1 μm Γ -gate PHEMT의 RF 특성으로, Agilent사의 8510C Vector Network Analyzer와 4156A Precision Semiconductor Parameter Analyzer를 이용하여 45 MHz~50 GHz의 주파수 영역에서 측정된 결과, 전류이득 차단주파수(f_T)는 113 GHz, 최대공진 주파수(f_{max})는 180 GHz의 측정결과를 나타내었다.

V-band MIMIC 저잡음 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작 특성을 표현하는 비선형 모델의 개발이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 EEHEMT1(EEs of scalable nonlinear HEMT 1) 모델을 이용하여 PHEMT의 비선형 모델을 추출하였다^[5-7]. 비선형 모델링은 단위 게이트 폭이 70 μm 이고 핑거수가 2개인 PHEMT 소자를 추출하였다. PHEMT의 비선형 모델의 추출 결과를 1 ~ 50 GHz 영역에서 측정 결과와 비교하였으며,

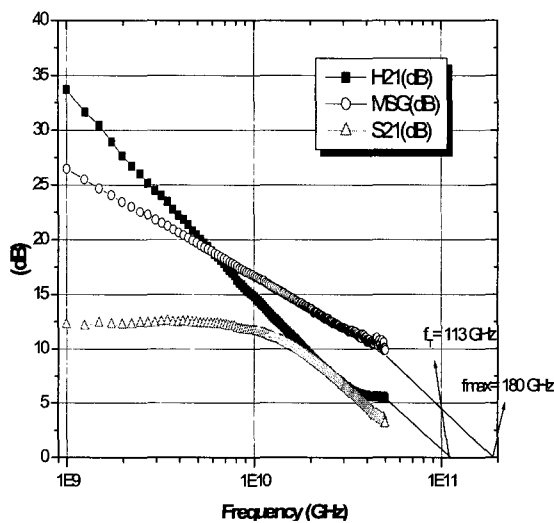


그림 4. PHEMT의 RF 특성 측정 결과
Fig. 4. The RF characteristics measured results of PHEMT.

모델과 측정값이 잘 일치하였다. PHEMT의 비선형 모델의 추출결과를 그림 5에 나타내었다.

V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 설계에서 임피던스 정합을 위해 다양한 CPW 패턴을 설계, 제작하여 수동소자 라이브러리를 구축하였다. CPW는 마이크로 스트립 라인에 비하여 후면 공정이 필요 없는 장점을 가지고 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며, 다수의 회로들이 발표되고 있다^[8-9]. CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70 Ω 의 특성 임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 Curve, Tee, Cross의 라이브러리를 구축하였다.

또한 저항 및 커패시터 등의 수동소자 라이브러리를 구축하였으며, 이러한 라이브러리를 이용하여 제작된

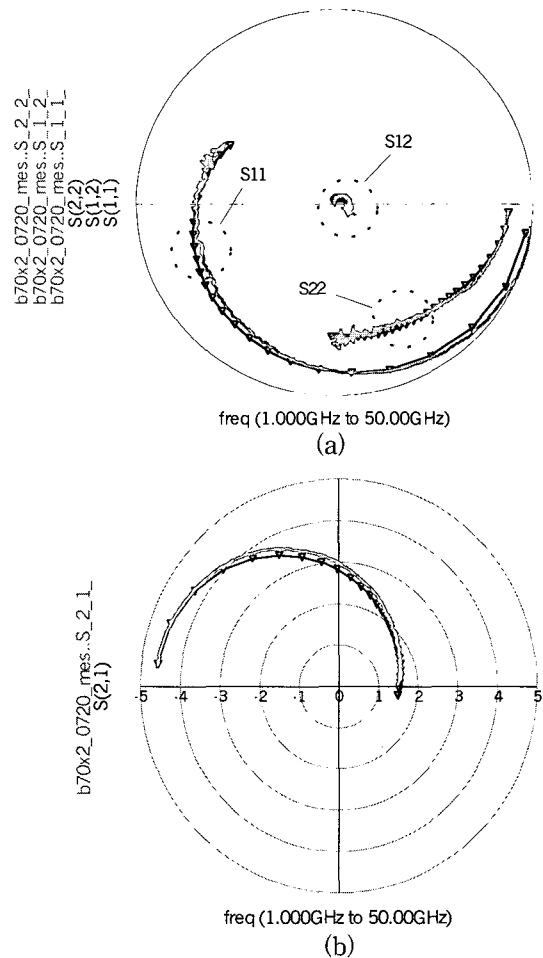


그림 5. PHEMT의 소자 모델링 결과 (— : modeled data, \circ : measured data) : (a) S11, S22, S12,, (b) S21
Fig. 5. The modeling result of PHEMT (— : modeled data, \circ : measured data) : (a) S11, S22, S12, (b) S21.

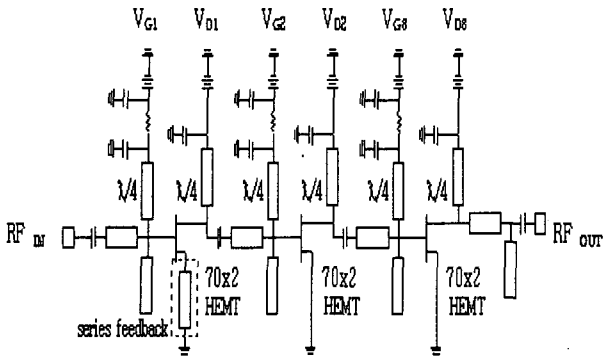


그림 6. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 회로도
Fig. 6. The circuit diagram of V-band MIMIC LNA.

수동소자의 특성은 Ti 박막저항은 $31 \sim 33 \Omega/\square$ 의 sheet resistance 및 MIM 커패시터는 $0.485 \sim 0.583 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ 의 커패시턴스를 나타내었다.

그림 6은 PHEMT 및 CPW 라이브러리를 이용하여 설계된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 회로도이다. V-band MIMIC저잡음 증폭기의 전체 회로는 3단으로 구성되었으며, CPW를 사용하여 정합회로를 구성하였다. 또한 저잡음 증폭기의 잡음특성과 안정화의 향상을 위해 첫 번째 단계에 series feedback를 사용하였으며, 광대역 특성을 얻도록 정합회로를 설계하였다.

바이어스 라인은 $\lambda/4$ short stub를 사용하여 60 GHz 대역 고주파 신호가 바이어스 라인으로 손실되는 것을 막도록 설계하였다. 또한 바이어스 라인에 저항을 추가하여 저주파대역의 신호손실 방지와 안정도를 추구하였다. 설계된 전체 회로 패턴은 모멘텀 시뮬레이션을 이용하여 최적화를 수행하였다.

III. V-band 저잡음 증폭기의 제작과 특성분석

V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 제작을 위해 적용된 단위공정은 소자의 전기적 격리를 위한 MESA 식각 공정, AuGe/Ni/Au 계의 금속층을 이용한 Ohmic 접촉 공정, Ti를 이용한 박막 저항 공정, 전자선 묘화를 이용한 $0.1 \mu\text{m}$ Γ -gate 공정, 신호의 전송선로와 수동소자 그리고 DC 및 접지 형성을 위한 1차 금속층 형성 공정, 노출된 소자의 채널의 보호와 MIM 커패시터의 유전 박막 형성을 위한 Si_3N_4 적층 공정과 격리된 소스 전극을 상호 연결하기 위한 에어 브리지 공정 등의 순으로 적용되었다. 그림 7은 PHEMT를 이용한 V-band MIMIC 저잡음 증폭기를 제작하는 단위 공정의 흐름을 보여주고 있다.

V-band MIMIC 저잡음 증폭기를 제작하기 위해

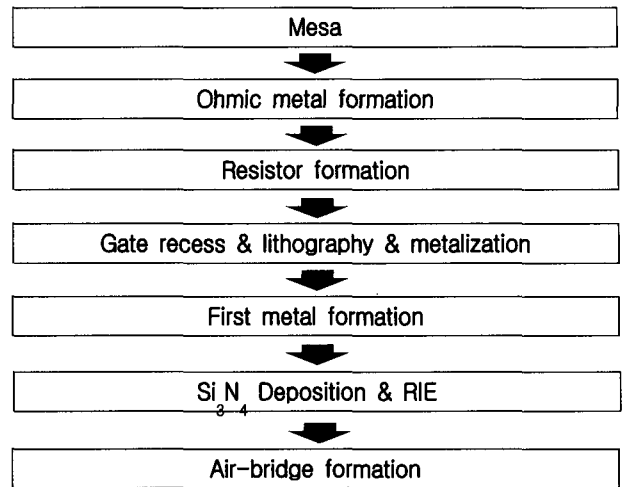


그림 7. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 제작 단계
Fig. 7. Fabrication flow of V-band MIMIC LNA.

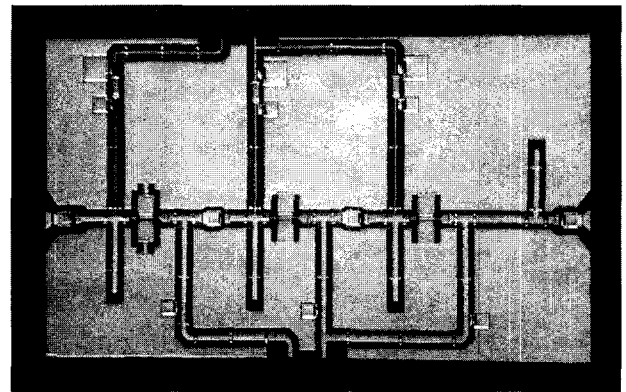


그림 8. 제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기 사진
Fig. 8. The Photograph of the fabricated V-band MIMIC LNA.

CPW 라인과 Si_3N_4 유전 박막 사용한 Metal-Insulator-Metal (MIM) 커패시터, Ti 박막 저항, 에어 브리지 및 게이트 길이가 $0.1 \mu\text{m}$ 인 PHEMT를 칩 내부에 일괄 형성하였다^[10-12]. 그림 8은 제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 표면사진으로 칩 면적은 $2.61 \times 1.52 \text{ mm}^2$ 이다.

제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기는 Agilent사의 85106D Vector Network Analyzer를 사용하여 50~75 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S 파라미터 특성 측정을 수행하였다. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 측정결과, 최대 S_{21} 이득은 60 GHz에서 21.3 dB의 결과를 얻었으며, 이때 입력반사 계수는 60 GHz에서 -10.6 dB, 출력반사계수는 62.5 GHz에서 -29.7 dB의 특성을 나타내었다. 또한, 측정 시 높은 S_{21} 이득 특성의 향상을 위해 바이어스를 조정하는 과정에서 60 GHz 전후에서 약 4 dB의 이득리플이 발생하였다. 제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기는 60 GHz에서 4.23 dB

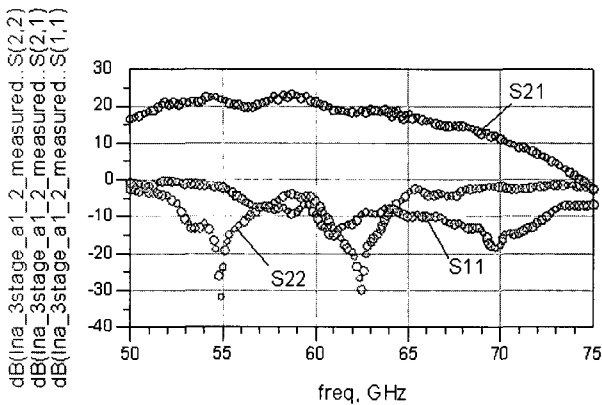


그림 9. V-band 저잡음 증폭기의 S 파라미터 특성 측정 결과

Fig. 9. S-parameters . measured results of V-band MIMIC LNA.

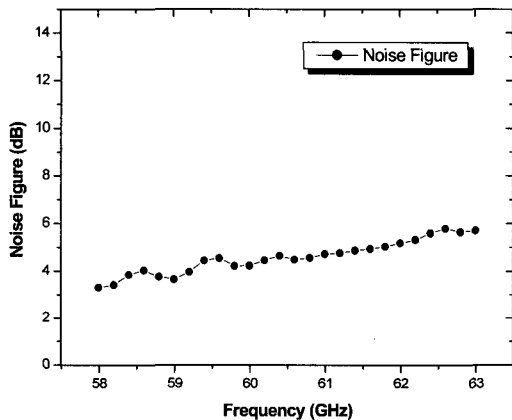


그림 10. V-band 저잡음 증폭기의 잡음지수 특성 측정 결과

Fig. 10. noise figure (NF) measured results of V-band MIMIC LNA.

표 1. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 특성비교
Table 1. The comparison of V-band MIMIC LNA's.

항목	S ₂₁ 이득	잡음지수	대역폭	참고문헌
1	14.9 dB	6.7 dB	57 - 62 GHz	[10]
2	10.5 dB	5.2 dB	48 - 60 GHz	[13]
본 논문	21.3 dB	4.23 dB	50 - 66 GHz	

의 잡음지수를 나타내었다. 그림 9는 V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 S 파라미터 측정 결과를 나타낸 것이고, 그림 10은 잡음지수의 측정결과를 나타낸 것이다.

본 논문에서 제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기는 series feedback의 사용과 광 대역 및 고이득의 특성을 갖도록 제작되어 기존의 V-band MIMIC 저잡음 증폭기에 비해 우수한 결과를 나타내었다^{[10],[13]}. 표 1은 본 논문과 기존에 발표된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기

의 특성을 비교한 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 0.1 μm Γ -gate PHEMT 및 CPW 라이브러리를 이용하여 V-band용 MIMIC 저잡음 증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 PHEMT의 DC 및 RF 특성으로, 드레인 포화 전류 밀도는 450 mA/mm, 최대 전달컨덕턴스는 363.6 mS/mm이며, 진류이득 차단주파수는 113 GHz, 최대 공진 주파수는 180 GHz이다. V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 설계는 PHEMT의 비선형 모델과 CPW 라이브러리를 이용하여 설계하였으며, 설계된 저잡음 증폭기는 PHEMT MIMIC 공정 기술을 이용하여 제작되었다.

제작된 V-band MIMIC 저잡음 증폭기의 측정결과, 60 GHz에서 최대 S₂₁ 이득은 21.3 dB, 입력반사계수는 -10.6 dB 그리고 62.5 GHz에서 출력반사계수는 -29.7 dB의 특성을 나타내었다. 또한, 60 GHz에서 4.23 dB의 잡음지수를 나타내었다.

본 논문에서 연구된 V-band 저잡음 증폭기는 고이득 및 저잡음지수의 특성을 나타내어 60 GHz 무선 LAN에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] H-L. A. Hung et al., "60-GHz GaAs MMIC low-noise amplifiers," *Proceedings of IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp*, pp.87-90, 1988.
- [2] J. Brenz et al., "44-GHz monolithic low-noise amplifier," *Proceedings of IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp*, pp. 15-18, 1987.
- [3] Skolnik, M. I., "Millimeter and Submillimeter Wave Application," *Proceedings of the Symposium on Submillimeter Waves*, pp. 9-25, 1970.
- [4] J.B. Shealy, M. M. Hashemi, K. Kiziloglu, S. P. DenBaars, U. K. Mishira, T. K. Liu, J. J. Brown, and M. Lue, "High-Breakdown Voltage AlInAs/GaInAs Junction Modulated HEMT's(JHEMT's) with Regrown Ohmic Contacts by MOCVD," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 545-547, 1993.
- [5] W. R. Curtice, "A MESFET model for use in the design of GaAs integrated circuits," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 28, no. 5, pp. 448-456, 1980.

- [6] P. C. Canfield, S. C. F. Lan, "Modeling of frequency and temperature effects in GaAs MESFETs," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 25, no. 1, pp. 299-306, 1990.
- [7] J. M. Golio, M. Miller, G. Maracus, and D. Johnson, "Frequency dependent electrical characteristics of GaAs MESFETs," *IEEE Transactions, Electron Devices*, vol. 37, no. 5, pp. 1217-1227, 1990.
- [8] Dan An, Bok Hyung Lee, Yeon Sik Chae, Hyun Chang Park, Hyung Moo Park and Jin Koo Rhee, "Low LO Power V-band CPW Down-Converter Using a GaAs PHEMT," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 41, no. 6, pp. 1013-1016, 2002.
- [9] Won-Young Uhm, Woo-Suk Sul, Han-Shin Lee, Sam-Dong Kim, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "High-Performance V-band Monolithic Quadruple Subharmonic Mixer With Anti-Parallel Diode Pair," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 40, no. 5, pp. 349-352, 2004.
- [10] Tae-Sin Kang, Seong-Dae Lee, Bok-Hyoung Lee, Sam-Dong Kim, Hyun-Chang Park, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "Design and Fabrication of a Low-Noise Amplifier for the V-band," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 41, no. 4, pp. 533-538, 2002.
- [11] 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," *Proceeding of Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD)*, pp. 121-124, 2000.
- [12] Il-Hyeong Lee, Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee, "Studies on Air-Bridge Processes for mm-wave MMIC's Applications," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 35, no. 12, pp. S1043-S1046, 1999.
- [13] M. Schlechtweg, W. Reinert, P.J. Tasker, R. Bosch, J. Braunstein, A. Hulsmann, K. Kohler, "Design and characterization of high performance 60GHz Pseudomorphic MODFET LNAs in CPW-Technology Based on Accurate S-Parameter and Noise Models," *Proceedings of IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp*, pp. 29-32, 1992.

저 자 소 개



조 창 식(학생회원)
2002년 경원대학교 물리학과
학사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
석사과정.
<주관심분야: 밀리미터파 소자 및
회로 설계 제작>



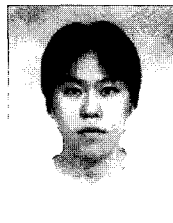
안 단(학생회원)
1998년 동국대학교 전자공학과
학사 졸업.
2000년 동국대학교 전자공학과
석사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
박사 과정.

<주관심분야: MMIC 설계 및 소자 모델링>



이 성 대(학생회원)
1998년 동국대학교 전자공학과
학사 졸업.
2000년 동국대학교 전자공학과
석사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
박사 과정

<주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제작>



백 태 종(학생회원)
2002년 중부대학교 정보통신
공학과 학사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
석사 과정.
<주관심분야: MEMS 설계 및 제
작>



진 진 만(학생회원)
2002년 국립한경대학교
전자공학과 학사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
석사 과정.
<주관심분야: MMIC 설계 및 소
자 모델링>



최 석 규(학생회원)
2003년 국립한경대학교
전자공학과 학사 졸업.
현 재 동국대학교 전자공학과
석사 과정.
<주관심분야: 밀리미터파 소자 및
회로 설계 제작>



김 삼 동(정회원)
1983년 서울대학교 금속공학과
학사 졸업.
1985년 서울대학교 금속공학과
석사 졸업.
1989년 Ph.D. Department of
Materials Science &
Engineering, Stanford
University, USA

현 재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수
<주관심분야: solid state microelectronic device>



이 진 구(평생회원)
1969년 국립항공대학교 전자공학
과
학사 졸업.
1975년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
1982년 Oregon State University,
USA 전기공학과 박사졸업

현 재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수 겸
밀리미터파 신기술 연구센터 소장
<주관심분야 : 반도체 및 집적회로>

