

논문 2004-41SD-9-4

# Metamorphic HEMT를 이용한 100 GHz MIMIC 증폭기의 설계 및 제작

## (Design and Fabrication of 100 GHz MIMIC Amplifier Using Metamorphic HEMT)

안 단\*, 이 복 형\*, 임 병 옥\*, 이 문 교\*, 백 용 현\*, 채 연 식\*\*, 박 형 무\*\*\*, 이 진 구\*\*\*

(Dan An, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, Mun-Kyo Lee, Yong Hyun Beak, Yeon-Sik Chae, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee)

### 요 약

본 논문에서는 0.1  $\mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT (High Electron Mobility Transistor)를 이용하여 100 GHz 대역의 MIMIC(Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 증폭기를 설계 및 제작하였다. MIMIC 증폭기의 제작을 위해 Metamorphic HEMT(MHEMT)를 설계 및 제작하였으며, 제작된 MHEMT의 드레인 전류 밀도는 640 mA/mm, 최대 전 달컨덕턴스(Gm)는 653 mS/mm를 얻었으며, RF 특성으로 fT는 173 GHz, fmax는 271 GHz의 양호한 성능을 나타내었다. 100 GHz MIMIC 증폭기의 개발을 위해 MHEMT의 소신호 모델과 CPW 라이브러리를 구축하였으며, 이를 이용하여 MIMIC 증폭기를 설계하였다. 설계된 증폭기는 본 연구에서 개발된 MHEMT MIMIC 공정을 이용해 제작되었으며, 100 GHz MIMIC 증폭기의 측정결과, 100 GHz에서 10.1 dB 및 97.8 GHz에서 12.74 dB의 양호한 S21 이득 특성을 나타내었다.

### Abstract

In this paper, the 0.1  $\mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT, which is applicable to MIMIC, and a 100 GHz MIMIC amplifier were designed and fabricated. The DC characteristics of MHEMT are 640 mA/mm of drain current density, 653 mS/mm of maximum transconductance. The current gain cut-off frequency(fT) is 173 GHz and the maximum oscillation frequency(fmax) is 271 GHz. A 100 GHz amplifier was designed using 0.1  $\mu\text{m}$  MHEMT and CPW technology. The measured results from the 100 GHz MIMIC amplifiers show good S21 gain of 10.1 dB and 12.74 dB at 100 GHz and 97.8 GHz, respectively.

**Keywords :** MIMIC, Metamorphic HEMT, W-band, Amplifier

### I. 서 론

현재 상용화되어 있는 마이크로파 대역 주파수 자원의 고갈과 새로운 멀티미디어 서비스 수요의 증가로 인해 주파수 대역이 한계점에 이르고 있는 상태이다. 이

에 따라, 넓은 대역폭을 제공할 수 있으며 주파수 재사용율이 높은 밀리미터파 대역을 기반으로 하는 서비스 기술이 주목받고 있으며, 그에 따른 제반 기술 개발의 중요성이 증가되고 있다. 밀리미터파 대역중 V-band (50~75 GHz)인 60 GHz 대역은 산소분자의 강한 신호 흡수 특성을 가지고 있어서 상업적으로는 가정 및 사무용 무선 LAN에 응용되고 있다. 이보다 높은 W-band (75~110 GHz) 대역은 신호 흡수 감쇠가 적어 77 GHz 차량충돌 방지 시스템이나 94 GHz와 100 GHz 대역의 경우 레이더 및 유도 무기 추적장치 등의 군사적인 이용을 위해 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 W-band 대

\* 학생회원, \*\*정회원, \*\*\* 평생회원

동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터

(Millimeter-wave INnovation Technology research)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터(MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터(ERC) 지원금에 의하여 수행되었습니다.

접수일자: 2004년5월22일, 수정완료일: 2004년8월31일

역에서 동작하는 증폭기의 경우 75 GHz 이상 100 GHz 대역에서 동작을 해야 하기 때문에 매우 우수한 특성을 갖는 능동소자의 설계, 제작기술이 필요하다. 따라서 현재 상용화 되어 있는 HEMT 및 PHEMT (Pseudomorphic HEMT) 소자로는 제작이 불가능하며, 100 GHz 대역의 경우 국내에서는 아직 소형화 및 신뢰성의 장점이 있는 MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuits)에 대한 보고가 거의 없는 실정이다. 외국의 경우 PHEMT가 아닌 이보다 성능이 우수한 InP HEMT를 이용한 결과들이 발표되고 있다<sup>[2-3]</sup>. 그러나 InP의 경우 매우 고가이며 3인치 이상의 기판에서 성장하는 것이 어려운 단점이 있어, 기존의 GaAs 기판위에 성장시킬 수 있는 Metamorphic HEMT가 최근 활발히 연구되고 있다. MHEMT의 경우 InP HEMT의 비해 상대적으로 가격이 저렴하며, 3인치 이상의 GaAs 기판에서 성장이 가능하면서도 InP HEMT와 대등한 성능을 갖는 결과들이 발표되고 있다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 100 GHz 대역의 MIMIC 증폭기의 개발을 위해 Metamorphic HEMT를 설계, 제작하였으며, 회로 설계를 위한 CPW 및 수동소자 라이브러리를 구축한 후 이를 이용하여 100 GHz MIMIC 증폭기를 설계 및 제작하였다.

### II. MIMIC 증폭기의 설계

그림 1에 100 GHz MIMIC 증폭기 설계에 사용된 MHEMT의 에피층을 나타내었다. 버퍼층은  $In_xAl_{1-x}As$  버퍼 레이어를 0에서 50 %까지 인듐의 mole fraction을 변화시키며 S·I GaAs 기판위에 1  $\mu m$ 의 두께로 성장시켰다. 또한 400 nm 두께의  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  버퍼를 활성층을

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	$6 \times 10^{18}/cm^3$	15 nm
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	undoped	15 nm
	$\delta$ -doping $4.5 \times 10^{12}/cm^2$	
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	undoped	3 nm
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	undoped	23 nm
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	undoped	4 nm
	$\delta$ -doping $1.3 \times 10^{12}/cm^2$	
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	undoped	400 nm
$In_xAl_{1-x}As$ ( $x = 0 \sim 0.5$ )	undoped	1000 nm
S.I. GaAs substrate		

그림 1. Metamorphic HEMT 에피층.  
Fig. 1. Epi-structure of Metamorphic HEMT.

보호하기 위하여 성장시켰다. 버퍼층 위에 활성층은 23 nm 두께의  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  채널층과 Si로 도핑된 double  $\delta$ -doping층으로 구성되어 있으며, 15 nm 두께의 n+  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  Cap 레이어를 소스-드레인 간의 오믹 접촉을 위해 성장시켰다. 성장된 에피층은 측정결과  $3.4 \times 10^{12}/cm^2$ 의 electron sheet density와  $9700 cm^2/V \cdot sec$ 를 나타내었다.

그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작하였으며 제작을 위해 적용된 단위공정으로는 소자의 전기적 격리를 위한 MESA 식각 공정, AuGe/Ni/Au 계의 금속층을 이용한 오믹 공정, E-beam 시스템을 이용한 0.1  $\mu m$   $\Gamma$ -gate 공정, 격리된 소오스 전극을 상호연결하기 위한 에어 브리지 공정, 노출된 소자 채널을 보호하기 위한  $Si_3N_4$  적층 공정 등의 순으로 적용되었다<sup>[5]</sup>. 제작된 MHEMT의 전류-전압 및 전달컨덕턴스 특성을 4156A

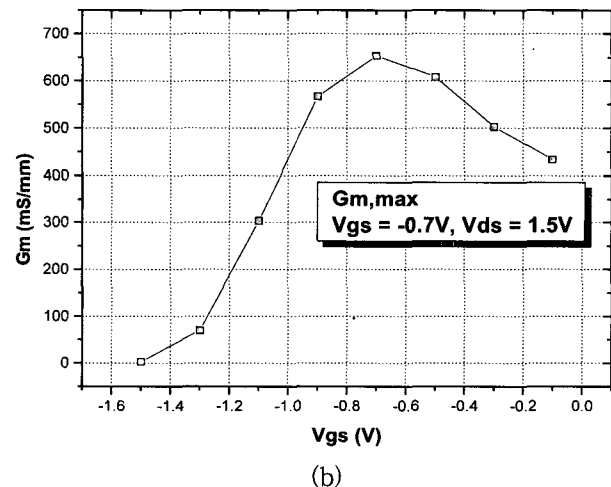
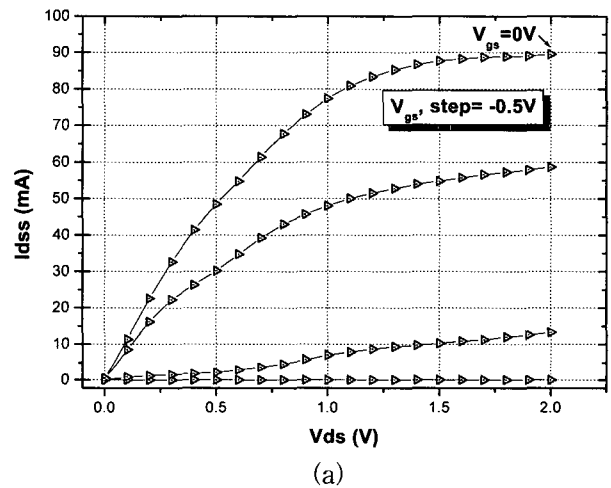


그림 2. Metamorphic HEMT의 DC 특성 측정 결과: (a) DC-IV 특성, (b) 전달컨덕턴스 특성.  
Fig. 2. The DC measured result of Metamorphic HEMT: (a) DC-IV characteristics, (b) Transconductance characteristics.

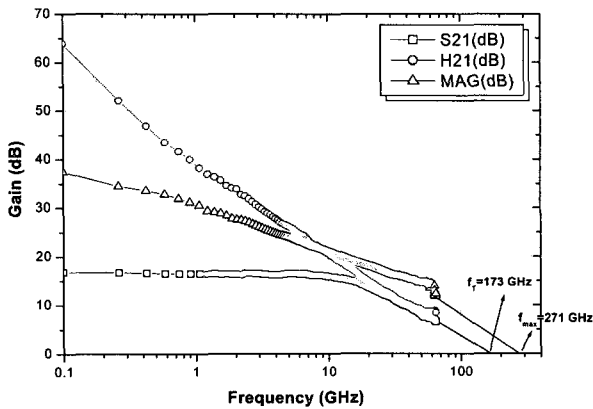


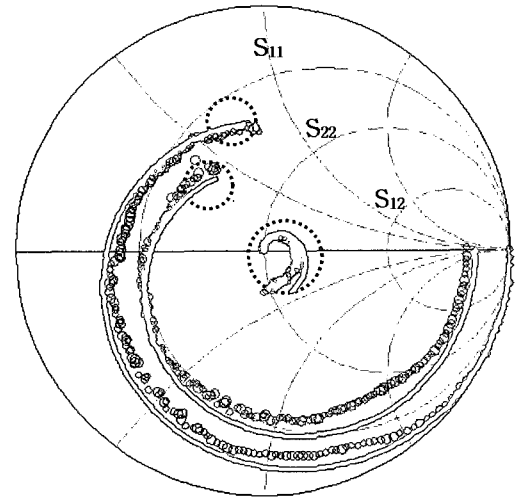
그림 3. Metamorphic HEMT의 이득 특성 측정 결과.  
Fig. 3. The gain measured result of Metamorphic HEMT.

Semiconductor parameter analyzer로 측정하였다. 제작된 MHEMT의 DC 특성을 그림 2에 나타내었으며 측정 결과 단위 게이트 폭이 70  $\mu\text{m}$ 이고 핑거 수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 핀치 오프 전압은 -1.5 V, 포화전류는  $V_{gs} = 0$  V에서 89.6 mA 로 드레인 전류 밀도는 640 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스( $G_m$ )는 653 mS/mm를 얻었다.

제작된 MHEMT의 S-parameter는 ME7808A Vector Network Analyzer를 이용하여 0.1~65 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 그림 3은 70  $\mu\text{m} \times 2$  핑거인 MHEMT의 RF 특성으로, 65 GHz에서 6.63 dB의  $S_{21}$  이득을 나타내었으며, 전류이득 차단주파수는 173 GHz, 최대공진 주파수는 271 GHz의 측정결과를 얻었다.

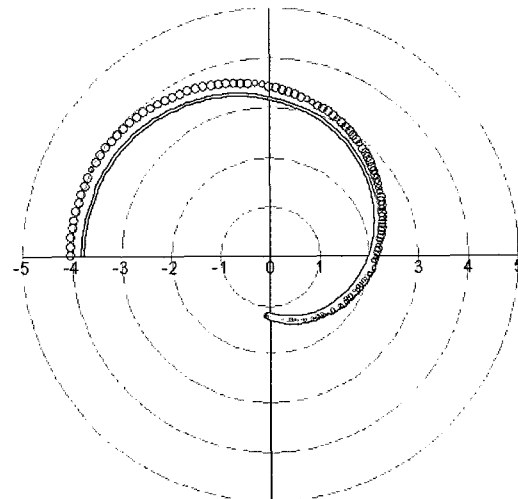
MIMIC 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작 특성을 표현하는 소자 모델의 개발이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 MHEMT의 소신호 모델을 추출하였다<sup>[6-8]</sup>. 소신호 모델링은 단위게이트 폭이 70  $\mu\text{m}$ 이고 핑거 수가 2개인 MHEMT 소자를 추출하였다. MHEMT의 소신호 모델의 추출 결과를 45 MHz에서 110 GHz영역에서 비교하였으며, W-band 대역에서 모델과 측정값이 잘 일치하였다. MHEMT의 소신호 모델의 추출결과를 그림 4에 나타내었다. MIMIC 증폭기의 설계 및 제작을 위해 다양한 CPW 패턴을 설계, 제작하였다. CPW는 마이크로 스트립 라인에 비하여 후면 공정이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며, 다수의 회로들이 발표되고 있다<sup>[9-10]</sup>.

CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70  $\Omega$ 의 특성 임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 Curve, Tee, Cross의 라이브



freq (45.00MHz to 110.0GHz)

(a)



freq (45.00MHz to 110.0GHz)

(b)

그림 4. MHEMT의 소자 모델링 결과; — : modeled data, ○ : measured data: (a)  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ , (b)  $S_{21}$ .

Fig. 4. The modeling result of MHEMT; — : modeled data, ○ : measured data: (a)  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ . (b)  $S_{21}$ .

러리를 구축하였다. 또한 저항 및 캐패시터의 수동소자 라이브러리를 구축하였으며, 제작된 Ti 박막저항은 31.1 ~ 35.1  $\Omega/\square$ 의 sheet resistance 및 MIM 캐패시터는 1.17 ~ 8.89 pF의 캐패시턴스 값을 나타내었다.

그림 5에 100 GHz MIMIC 증폭기의 회로도를 나타내었다. 증폭기의 전체 회로는 2단으로 구성하였으며, CPW 라인을 사용하여 정합회로를 구성하였다. 바이어스 라인은  $\lambda/4$  short stub를 사용하여 100 GHz 대역 고주파 신호의 바이어스 라인으로의 손실을 막도록 설계하였

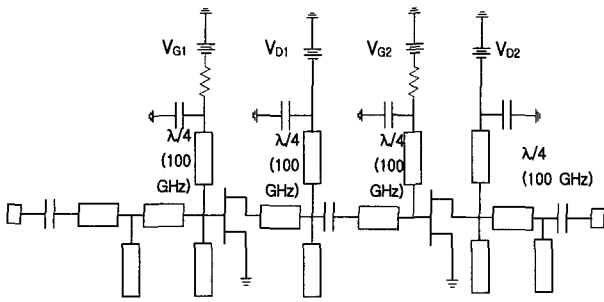


그림 5. 100 GHz MIMIC 증폭기 회로도.  
Fig. 5. The circuit diagram of 100 GHz MIMIC amplifier.

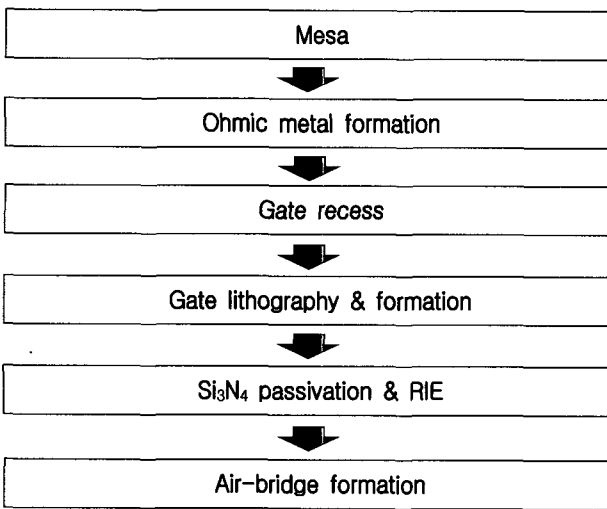


그림 6. MIMIC 증폭기 제작 단계.  
Fig. 6. Fabrication flow of MIMIC amplifier.

다. 또한 바이어스 라인의 저항을 추가하여 안정도를 향상시켰다. 설계된 전체 회로 패턴은 모멘텀 시뮬레이션을 이용하여 최적화를 수행하였다.

### III. MIMIC 증폭기의 제작 및 측정

MIMIC 증폭기를 제작하기 위해 CPW 라인과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 유전체 사용한 MIM 캐패시터, Ti 박막 저항, 에어브리지, 게이트 길이가 0.1 μm인 MHEMT를 칩 내부에 일괄 형성하였다<sup>[11-13]</sup>. 그림 6에 100 GHz MIMIC 증폭기의 공정 단계를 나타내었다. 그림 7은 제작된 MIMIC 증폭기의 표면사진으로 칩 면적은 1.8 mm × 1.0 mm이다.

제작된 MIMIC 증폭기는 Anritsu사의 ME7808A Vector Network Analyzer를 사용하여 70~110 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S-parameter 특성을 측정하였다. 증폭기의 측정결과 100 GHz에서 10.1 dB의 양호한 S<sub>21</sub> 이득 특성을 얻었으며 최대 이득은 97.8 GHz에서 12.74 dB의 결과를 얻었다. 입력반사 계수는 95.2 GHz에서 -18.3 dB, 출력반사계수는 103.4 GHz에

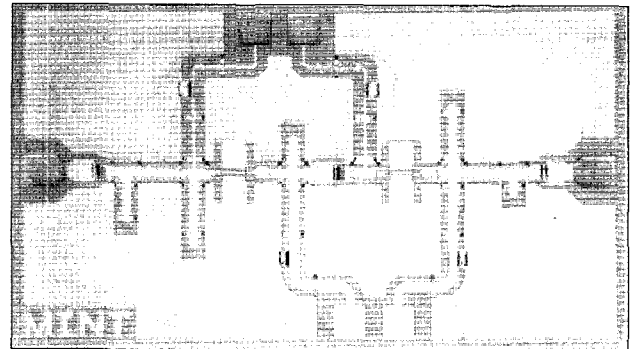


그림 7. 제작된 MIMIC 증폭기 사진.  
Fig. 7. Photograph of the fabricated MIMIC amplifier.

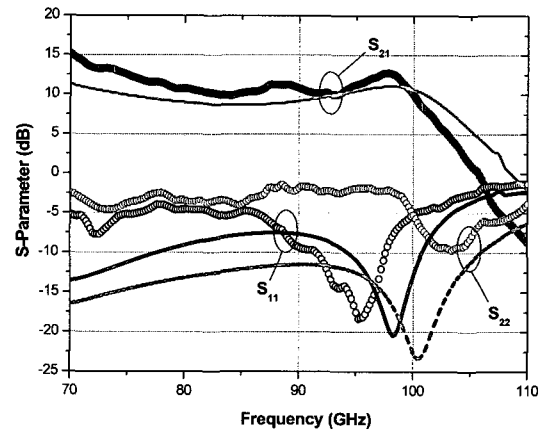


그림 8. MIMIC 증폭기의 S-parameter 특성 측정결과 (—: simulation, ○: measured).  
Fig. 8. S-parameter measured results of MIMIC amplifier (—: simulation, ○: measured).

서 -9.8 dB의 특성을 나타내었다. 그림 8에 100 GHz MIMIC 증폭기의 S-parameter 시뮬레이션 및 측정결과를 나타내었다.

### IV. 결론

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT 및 CPW 라이브러리를 이용하여 100 GHz 대역의 MIMIC 증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 MHEMT의 드레인 전류 밀도는 640 mA/mm, 최대 전달컨덕턴스(G<sub>m</sub>)는 653 mS/mm를 얻었으며, f<sub>T</sub>는 173 GHz, f<sub>max</sub>는 271 GHz의 특성을 나타내었다. 100 GHz MIMIC 증폭기의 설계는 MHEMT의 소신호 모델과 CPW 라이브러리를 이용하여 설계하였다. 설계된 증폭기는 MHEMT MIMIC 공정을 이용해 제작되었으며, MIMIC 증폭기의 측정결과, 100 GHz에서 10.1 dB의 양호한 S<sub>21</sub> 이득 특성을 얻었으며 최대 이득은 97.8 GHz

에서 12.74 dB의 결과를 얻었다. 입력반사 계수는 95.2 GHz에서 -18.3 dB, 출력반사계수는 103.4 GHz에서 -9.8 dB의 특성을 나타내었다.

본 논문에서 연구된 증폭기는 100 GHz 주파수 대역에서 국내에 첫 번째로 보고되는 MIMIC 증폭기로 양호한 이득 특성을 나타내어 94 GHz 레이더 및 100 GHz 시스템의 응용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 연구된 MIMIC 증폭기의 설계 및 제작결과를 바탕으로 향후 소자 성능 향상과 회로 설계 최적화를 통해 더욱 우수한 성능의 100 GHz 대역의 MIMIC 증폭기를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. W. Chang, G. S. Dow, H. Wang, T. H. Chen, K. Tan, B. Allen, and J. Berenz, "A W-band Single-chip Transceiver for FMCW Radar," IEEE 1993 Microwave and Millimeter-wave Circuit Symposium, pp. 41~44, 1993.
- [2] Robinder S. Virk, Long Tran, Mehran Matloubian, Minh Le, Michael G. Case, and Catherine Ngo, "A Comparison of W-band MMIC Mixers Using InP HEMT Technology," 1997 IEEE MTT-S Digest, pp. 435~438.
- [3] Yun Wei, Sangmin Lee, Krishnan Sundararajan, Mattias Dahlstrom, Muguel Urteaga, Mark Rodwell, "W-band InP/InGaAs/InP DHBT MMIC Power Amplifier," 2002 IEEE MTT-S Digest, pp. 917~920.
- [4] C. S. Whelan, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, S. M. Lardizabal, P. S. Lyman, P. F. Marsh, T. E. Kazior, "Low Noise In<sub>0.32</sub>(AlGa)<sub>0.68</sub>As/In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As Meta-morphic HEMT on GaAs substrate with 850 mW/mm output power density," IEEE Elec. Device Lett., vol. 21, no. 1, pp. 5~8, Jan. 2000.
- [5] Bok-Hyung Lee, Dong-Hoon Shin, Sam-Dang Kim, and Jin-Koo Rhee, "High Maximum Frequency of Oscillation of 0.1  $\mu$ m Off-set  $\Gamma$ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMTs," J. Korean Phys. Soc., vol. 43, no. 6, pp. 427~430, Sep. 2003.
- [6] G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, and E. Playez, "A New Method for Determining the FET Small-Signal Equivalent Circuit," IEEE Trans. Micro. Theory & Tech., vol. 36, no. 7, pp. 1151~1159, July 1988.
- [7] M. Y. Jeon, B. G. Kim, Y. J. Jeon, and Y. H. Jeong, "A Technique for Extracting Small-Signal Equivalent-Circuit Elements of HEMTs," IEICE Trans. Electron., vol. E82-C, no. 11, pp. 1968~1976, Nov. 1999.
- [8] W. R. Curtice, and R. L. Camisa, "Self-consistent GaAs FET Models for Amplifier Design and Device Diagnostics," IEEE Trans. Micro. Theory & Tech., vol. 32, pp. 1573~1578, Dec. 1984.
- [9] 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," J. Korean Phys. Soc., vol. 41, no. 6, pp. 1013~1016, Dec. 2002.
- [10] 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," Micro. and Optical Tech. Lett. vol. 40, no. 5, pp. 349~352, March 2004.
- [11] 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," J. Korean Phys. Soc., vol. 41, no. 4, pp. 533~538, Oct. 2002.
- [12] 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.
- [13] Il-Hyeong Lee, Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee, "Studies on Air-Bridge Processes for mm-wave MIMIC's Applications," J. Korean Phys. Soc., vol. 35, no. 12, pp. S1043~S1046, 1999.

저 자 소개



**안 단**(학생회원)  
 1998년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 2000년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),  
 2000년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정  
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



**이 복 형**(학생회원)  
 1999년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 2001년 동국대학교 전자공학과 석사과정 (공학석사),  
 2001년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정  
 <주관심분야: MMIC 공정, V-band system>



**이 문 교**(학생회원)  
 1999년 배재대학교 전자공학과 공학사,  
 2001년 동국대학교 전자공학과 공학석사,  
 2001년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정  
 <주관심분야: 무선통신 시스템, MIMIC 설계>



**임 병 옥**(학생회원)  
 2000년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 2002년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),  
 2002년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정  
 <주관심분야: MMIC 설계 및 공정, RF MEMS>



**백 용 현**(학생회원)  
 2003년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 2003년~현재 동국대학교 전자공학과 석사과정  
 <주관심분야: MMIC 설계 및 공정>



**채 연 식**(정회원)  
 1993년 동국대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1997년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사)  
 2002년 동국대학교 전자공학과 박사과정(공학박사)  
 2002년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수  
 <주관심분야: MMIC 설계, 무선통신 모듈설계>



**박 형 무**(평생회원)  
 1978년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사),  
 1980년 한국과학 기술원 전자공학과 공학석사  
 1984년 한국과학 기술원 전자공학과 공학박사  
 1999년~현재 동국대학교 전자공학과 교수  
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



**이 진 구**(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,  
 2002년~2003년 대한전자공학회 부회장,  
 2004년~현재 대한전자공학회 수석부회장,  
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,  
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장  
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>