

논문 2004-41SD-12-2

MHEMT를 이용한 DC ~ 45 GHz CPW 광대역 분산 증폭기 설계 및 제작

(DC ~ 45 GHz CPW Wideband Distributed Amplifier Using MHEMT)

진진만*, 이복형*, 임병옥*, 안단*, 이문교*, 이상진*,
고두현*, 백용현*, 오정훈*, 채연식*, 박형무*, 김삼동*, 이진구*

(Jin-Man Jin, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, Dan An, Mun-Kyo Lee, Sang-Jin Lee, Du-Hyun Ko, Yong Hyun Beak, Jung-Hun Oh, Yeon-Sik Chae, Hyung-Moo Park, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee)

요약

본 논문에서는 0.1 μm InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT (High Electron Mobility Transistor)를 이용하여 DC~45 GHz 대역의 광대역 MIMIC(Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 분산 증폭기를 설계 및 제작하였다. MIMIC 증폭기의 제작을 위해 Metamorphic HEMT(MHEMT)를 설계 및 제작하였으며, 제작된 MHEMT는 드레인 전류 밀도 442 mA/mm, 최대 전달컨덕턴스(Gm)는 409 mS/mm를 얻었다. RF 특성으로 fT는 140 GHz, fmax는 447 GHz의 양호한 성능을 나타내었다. 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 설계를 위해 MHEMT의 소신호 모델과 CPW 라이브러리를 구축하였으며, 이를 이용하여 MIMIC 분산 증폭기를 설계하였다. 설계된 분산 증폭기는 본 연구에서 개발된 MHEMT MIMIC 공정을 이용하여 제작하였으며, MIMIC 분산 증폭기의 측정결과, DC ~ 45 GHz대역에서 6 dB 이상의 S21 이득을 얻었으며, 입력반사 계수는 45 GHz에서 -10 dB, 출력반사계수는 -7 dB의 특성을 나타내었다. 제작된 분산 증폭기의 칩 크기는 2.0 mm×1.2 mm다.

Abstract

In this paper, CPW wideband distributed amplifier was designed and fabricated using 0.1 μm InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT(High Electron Mobility Transistor). The DC characteristics of MHEMT are 442 mA/mm of drain current density, 409 mS/mm of maximum transconductance. The current gain cut-off frequency(fT) is 140 GHz and the maximum oscillation frequency(fmax) is 447 GHz. The distributed amplifier was designed using 0.1 μm MHEMT and CPW technology. We designed the structure of CPW curve, tee and cross to analyze the discontinuity characteristics of the CPW line. The MIMIC circuit patterns were optimized electromagnetic field through momentum. The designed distributed amplifier was fabricated using our MIMIC standard process. The measured results show S21 gain of above 6 dB from DC to 45 GHz. Input reflection coefficient S11 of -10 dB, and output reflection coefficient S22 of -7 dB at 45 GHz, respectively. The chip size of the fabricated CPW distributed amplifier is 2.0 mm×1.2 mm.

Keywords : MIMIC, Metamorphic HEMT, CPW, distributed amplifier

I. 서론

최근 이동통신을 포함한 무선통신 서비스의 대중화

보급으로 기존의 고정 통신망에서 제공되는 각종 고속 통신 서비스의 무선화 및 초고속 대용량의 광대역 무선 멀티미디어 서비스가 요구되고 있으며 이에 따라 제반 기술 개발의 중요성도 증가되고 있다. 특히 부품 개발 시 넓은 대역에서 동작이 가능한 광대역 증폭기의 경우 다양한 시스템의 주파수 대역에서 사용될 수 있기에 개발된 부품의 효율성을 높일 수 있다. 광대역 특성을 갖는 증폭기의 경우 많은 종류가 있지만 분산 증폭

* 정회원, 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: 2004년6월21일, 수정완료일: 2004년12월3일

기의 경우 매우 넓은 대역폭을 갖는 증폭기 설계가 가능하다.

또한 증폭 특성의 개선을 위해 능동 소자로 PHEMT가 아닌 성능이 우수한 InP HEMT를 이용한 결과들이 발표되고 있다. 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^[1].

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

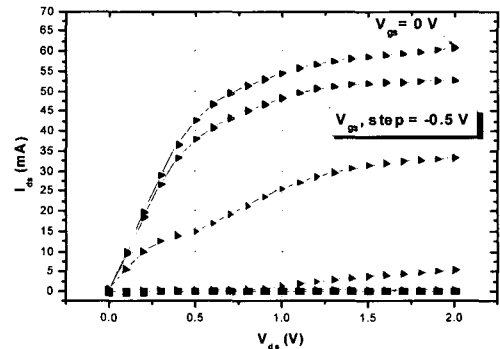
II. 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 설계

광대역 MIMIC 분산 증폭기 설계에 사용된 MHEMT의 에피층 구조를 그림 1에 나타내었다. 버퍼층은 $In_xAl_{1-x}As$ 버퍼 레이어를 0에서 50 %까지 인듐의 mole fraction을 변화시키며 S-I GaAs 기판위에 1 μm 의 두께로 성장시켰다. 그리고 400 nm 두께의 $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 버퍼층은 활성층을 보호하기 위하여 성장시켰으며, 버퍼층 위에 활성층은 23 nm 두께의 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 채널층과 Si로 도핑된 double Planar-doping층으로 구성되어 있다. 15 nm 두께의 n+ $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ Cap 레이어를 소스-드레인 간의 오믹 접촉을 위해 성장시켰고, 성장된 에피층은 측정결과 $3.4 \times 10^{12}/cm^2$ 의 electron sheet density와 $9700 cm^2/V \cdot sec$ 를 나타내었다.

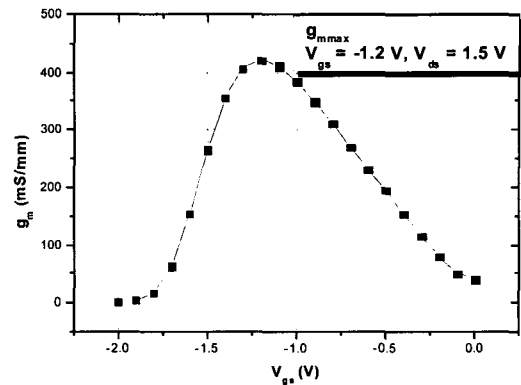
그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작하였으며 제작을 위해 적용된 단위공정으로는 소자의 전기적 격리를 위한 MESA 식각 공정, AuGe/Ni/Au 계의 금속층을 이용한 오믹 공정, E-beam 시스템을 이용한 0.1 μm Γ -gate 공정, 격리된 소오스 전극을 상호연결하기 위한 에어 브리지 공정, 노출된 소자 채널을 보호하기 위한 Si_3N_4 적층 공정 등의 순으로 적용되었다^[2]. 제작된 MHEMT의 DC 특성을 그림 2에 나타내었으며 측정결과 단위 게이트 폭이 70 μm 이고 핑거 수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 핀치 오프

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

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



(a)



(b)

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.

전압은 -1.7 V, 포화전류는 $V_{gs} = 0 V$ 에서 61.9 mA로 드레인 전류 밀도는 442 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스(G_m)는 409 mS/mm를 얻었다.

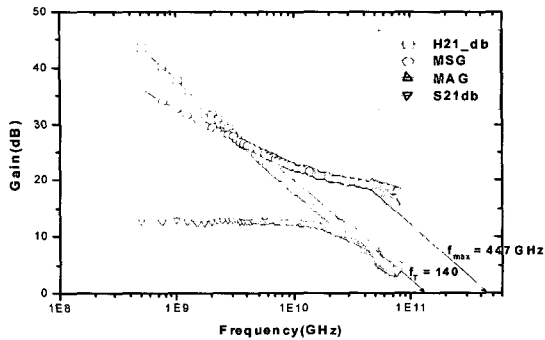


그림 3. Metamorphic HEMT의 RF 특성 측정 결과.
Fig. 3. The RF measured result of Metamorphic HEMT.

제작된 MHEMT의 S-parameter는 8510C vector network analyzer와 4156A Precision Semiconductor Parameter Analyzer를 이용하여 45 MHz ~ 50 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 그림 3은 70 μm \times 2 핑거인 MHEMT의 RF 특성으로, 50 GHz에서 7.92 dB의 S21 이득을 나타내었으며, 전류이득 차단주파수는 140 GHz, 최대공진 주파수는 447 GHz의 측정결과를 얻었다.

그림 4에 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 회로도를 나타내었다. 분산 증폭기는 제작된 MHEMT의 소신호 모델을 이용하여 설계하였으며 4개의 MHEMT를 사용하여 4 단 병렬구조로 설계하였다. 3단 구조는 대역 면에서는 만족할 수 있었으나 이득이 적었다. 5단 구조는 이득은 만족하였으나 대역이 좁고 공정상 오차에 의한 특성 변화를 고려하여 4단으로 설계하였다. 설계시 CPW와 수동소자를 사용하여 정합회로를 구성하였으며 CPW인 경우 마이크로스트립 라인과 비교하여 후면 공정이 필요 없어 공정이 간단하고 현재 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있다^[3]. 설계된 분산 증폭기는 L1과 L2는 $L1 = L2 / 2$ 로 75 ohm CPW Line을 사용하여 L1은 180 μm , L2는 360 μm 의 길이로 설계되었다^[4-5]. 설계시 Ground를 위해 트랜지스터의 source를 air bridge를 이용하여 연결하였다. 또한 게이트단의 RF 입력부에 35 ohm open stub를 달아 평탄도를 개선하였고 동시에 입력단의 정합회로로 사용하였으며, 드레인단의 출력부에도 35 ohm의 open stub를 정합회로로 사용하였다. 게이트와 드레인 바이어스 부분의 직, 병렬 저항은 분산 증폭기의 안정도 특성을 개선하기 위해 추가 하였다^[6-7]. 게이트 단의 저항 변화에 따른 특성 변화를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 5는 저항 (Rg)의 크기(20 ohm - 40 ohm)에 따른 S11과 S22의

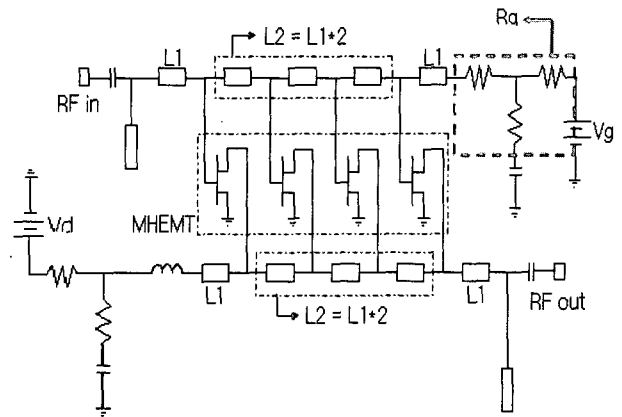
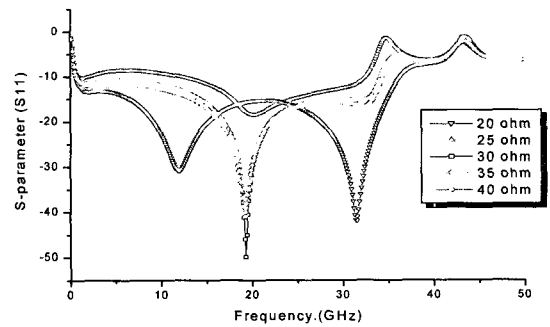
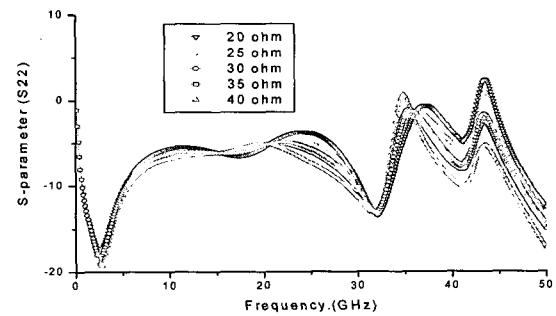


그림 4. MIMIC 분산 증폭기 회로도.
Fig. 4. The circuit diagram of MIMIC amplifier.



(a) S11의 특성 변화



(b) S22의 특성 변화.

그림 5. 게이트 저항 변화에 따른 S11과 S22의 특성 변화.

Fig. 5. Simulation results as gate resistor variable.
(a) S11, (b) S22 variation characteristic

특성 변화를 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 시뮬레이션 결과 25 ohm 보다 작은 저항을 달 경우 S22가 발진이 발생하고 40 ohm 보다 큰 저항을 달게 될 경우 S11이 발진 나는 것을 확인 하였으며 시뮬레이션 결과에서 나타난 바와 같이 각각에 30 ohm 저항을 달았을 때 가장 안정된 특성을 보여 30 ohm으로 설계하였다. 설계된 회로 패턴은 모멘텀 시뮬레이션을 이용하여 최적화를 수행하였다.

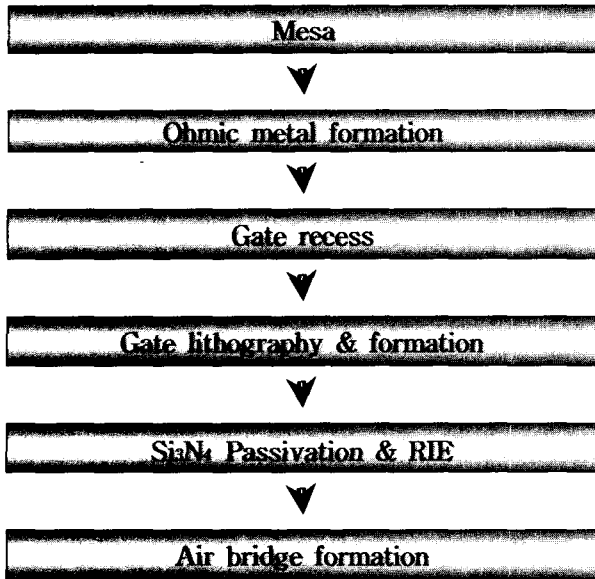


그림 6. 광대역 MIMIC 증폭기의 제작 단계.
Fig. 6. Fabrication flow of wideband MIMIC amplifier.

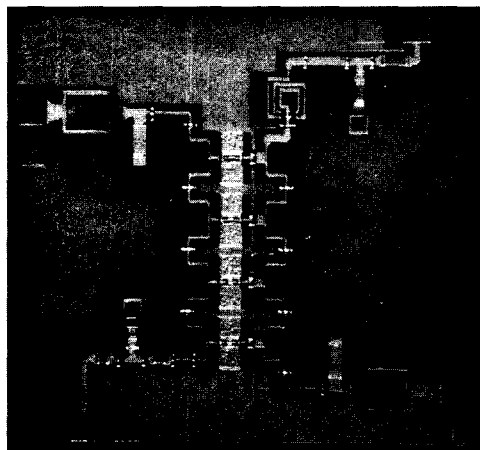


그림 7. 제작된 MIMIC 분산 증폭기 칩 사진
Fig. 7. Photograph of the fabricated MIMIC distributed amplifier.

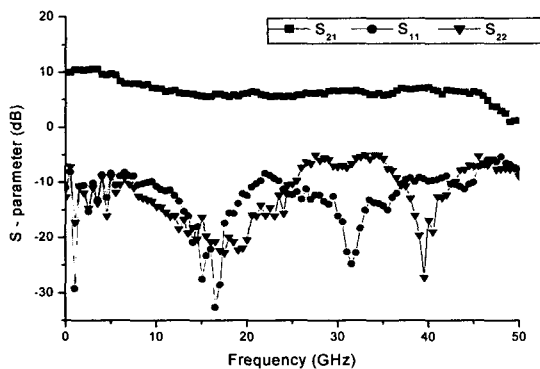


그림 8. 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 S-parameter 특성 측정결과.
Fig. 8. S-parameter measured results of Wide band MIMIC distributed amplifier.

III. 광대역 MIMIC 증폭기의 제작 및 측정

광대역 MIMIC 증폭기를 제작하기 위해 CPW 라인 과 Si_3N_4 유전체 사용한 MIM 캐패시터, Ti 박막 저항, 에어브리지, 게이트 길이가 $0.1 \mu\text{m}$ 인 MHEMT를 칩 내부에 일괄 형성하였다^[9]. 그림 6에 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 공정 단계를 나타내었으며 그림 7은 제작된 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 표면사진으로 칩 면적은 $2.0 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 이다.

제작된 광대역 MIMIC 분산 증폭기는 Agilent의 85106D Vector Network Analyzer를 사용하여 DC~50 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S-parameter 특성 측정을 수행하였다. 증폭기의 측정결과 DC~45 GHz의 넓은 대역 특성을 얻었으며 대역 내에서 6 dB 이상의 이득특성 결과를 얻었다. 이때 입력반사 계수는 45 GHz에서 -10 dB, 출력반사계수는 -7 dB의 특성을 나타내었다. 그림 8에 제작된 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 S-parameter 측정결과를 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT 및 CPW 라이브러리를 이용하여 광대역의 MIMIC 증폭기를 설계 및 제작하였다.

제작된 MHEMT의 드레인 전류 밀도는 442 mA/mm , 최대 전달컨덕턴스(G_m)는 409 mS/mm 를 얻었으며, f_T 는 140 GHz, f_{max} 는 447 GHz의 특성을 나타내었다. 광대역 MIMIC 증폭기의 설계는 MHEMT의 소신호 모델과 CPW 라이브러리를 이용하여 설계하였다. 설계된 증폭기는 MHEMT MIMIC 공정을 이용해 제작되었으며, 광대역 MIMIC 분산 증폭기의 측정결과, DC ~ 45 GHz 대역에서 6 dB 이상의 S_{21} 이득과 입력반사 계수는 45 GHz에서 -10 dB, 출력반사계수는 -7 dB의 특성을 나타내었다.

본 논문에서 연구된 광대역 분산 증폭기는 넓은 대역 폭과 양호한 이득 특성을 나타내었으며, 설계 및 제작결과를 바탕으로 향후 소자 성능 향상과 회로 설계 최적화를 통해 더욱 우수한 성능의 광대역 MIMIC 분산 증폭기를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] A. Leuther, A. Schwoerer, C. Massler, H. Kudsus, S. Reinert, W. Schlechtweg, M. "A coplanar 94 GHz low-noise amplifier MMIC using 0.07 μ m metamorphic cascode HEMTs Tessmann," *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1581 - 1584, June 2003.

[2] Bok-Hyung Lee, Dong-Hoon Shin, Sam-Dang Kim, and Jin-Koo Rhee, "High Maximum Frequency of Oscillation of 0.1 μ m off-set Γ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMTs," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 43, no. 6, pp.427~430, Sep 2003.

[3] D. An, S. C. Kim, W. S. Sul, H. J. Han, H. M. Park, and J.K. Rhee, "High Conversion gain Millimeter-Wave Subharmonic Mixer with Cascade 4th Harmonic Generator." *Microwave and optical technology letters*. vol. 41, no. 6, pp. 490-493, June 20 2004.

[4] Young Yun, Masaaki Nishijima, Motonari Katsuno, Hidetoshi Ishida, Katsuya Minagawa, Toshihide Nobusada, Tsuyoshi Tanaka, "A fully integrated broad-band amplifier MMIC employing a novel chip-size package," *IEEE Transactions on, Micr Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 50, Issue 12, pp. 2930~2937, Dec 2002.

[5] M. S. Heins, C. F. Campbell, M. T. E. Mur, and J. M. Carroll. "A GaAs MHEMT distributed amplifier with 300-GHz gain bandwidth product for 40-Gb/s optical applications," *2002 International IEEE MTT-S Symposium Digest*, vol. 2, pp. 1061-1064, June 2002.

[6] J. W. Archer, and A. Dadello. "Ultra-wideband, high-gain GaAs and InP-MMIC amplifiers," *2002 International IEEE APMC Symposium Digest*. vol. 1, pp. 247-250, Dec 2000.

[7] J. B. Bcyer, and S. N. Prasad, "MESFET distributed amplifier design guideline," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech*, vol. 32, no. 3, pp. 268-275, March 1984.

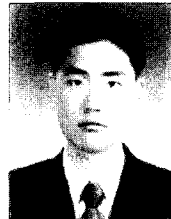
[8] Jeong, J. and Kwon, Y. "Monolithic Distributed Amplifier With Active Control Schemes for Optimum Gain and Group-Delay Flatness, Bandwidth, and Stability," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, Issue 4, pp. 1101 - 1110, April 2004.

[9] 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



진진만(정회원)
2003년 한경대학교 전자공학과 졸업(공학사),
2003년~현재 동국대학교 전자공학과 석사과정
<주관심분야: MMIC 설계, 무선 통신 모듈 설계>



이복형(정회원)
1999년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),
2001년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),
2001년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야: MMIC 공정, V-band system>



안단(정회원)
1998년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),
2000년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),
2000년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



임병욱(정회원)
2000년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),
2002년 동국대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),
2002년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야: MMIC 설계 및 공정, RF MEMS>

저 자 소 개



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



고 두 현(정회원)
 2003년 2월 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월~현재 동국대학교 전자공학과 석사과정
 <주관심분야: MIMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템>



오 정 훈(정회원)
 2003년 2월 동국대학교 전자공학과 기계공학과(공학사)
 2003년 2월~현재 동국대학교 전자공학과 석사과정
 <주관심분야: 미소고체전자 현상 분석>



박 형 무(정회원)
 1978년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사),
 1980년 한국과학기술원 전자공학과 석사과정(공학석사),
 1984년 한국과학기술원 전자공학과 박사과정(공학박사),
 1999년~현재 동국대학교 전자공학과 교수

<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



이 진 구(정회원)
 1969년 국립항공대학교 전자공학과 졸업(공학사),
 1975년 서울대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),
 1982년 Oregon State Univ. 전기공학과 (공학 박사),

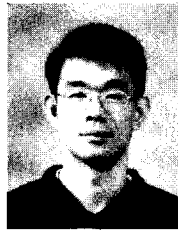
1985년 Cray Research Scientist,
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer,
 1995년~현재 한국 전자파학회 이사,
 2002년~2003년 대한전자공학회 부회장,
 2004년~현재 대한전자공학회 수석부회장,
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



이 상 진(정회원)
 2003년 중부대학교 정보통신공학과(공학사),
 2003년~현재 동국대학교 전자공학과 석사 과정
 <주관심분야: 반도체 및 RF 집적회로 설계, MIMIC를 이용한 통신 모듈설계>



백 용 현(정회원)
 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 전자공학 석사과정(공학석사)
 2002년 동국대학교 전자공학과 박사과정(공학박사)
 2002년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터 연구교수
 <주관심분야: MMIC 설계, 무선통신 모듈설계>



김 삼 동(정회원)
 1983년 서울대학교 금속공학과 졸업(공학사),
 1986년 서울대학교 금속공학과 대학원 석사과정 (공학석사)
 1992년 Department of Materials Science & Engineering, Stanford University 박사과정(공학박사),

1994년 스탠포드 대학교, Solid State Electronic Lab. Post-Doctorate,
 1999년 현대 전자 메모리 선행기술 연구부 박막 연구실 책임 연구원,
 1999년~현재 동국대학교 전자공학과 조교수
 <주관심분야: 미소고체전자 현상 분석>