

논문 2008-45SD-8-8

Metamorphic HEMT를 이용한 우수한 성능의 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기

(High-performance 94 GHz MMIC Low Noise Amplifier using
Metamorphic HEMTs)

김 성 찬*, 안 단**, 이 진 구***

(Sung-Chan Kim, Dan An, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 100 nm InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT (high electron mobility transistor)를 이용하여 94 GHz 대역 응용에 적용 가능한 MMIC (millimeter-wave monolithic integrated circuit) 저잡음 증폭기를 구현하였다. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기 구현을 위하여 제작된 100 nm × 60 μm MHEMT의 측정결과, 655 mA/mm의 드레인 전류 밀도, 720 mS/mm의 최대전달컨덕턴스를 얻었으며, RF 특성으로 전류이득차단주파수는 195 GHz, 최대공진주파수는 305 GHz의 양호한 성능을 나타내었다. 구축된 MHEMT와 CPW 라이브러리를 이용하여 구현된 MMIC 저잡음 증폭기의 측정결과, 94 GHz에서 S_{21} 이득은 14.8 dB, 잡음지수는 4.6 dB의 우수한 특성을 얻었다. 전체 칩의 크기는 1.8 mm × 1.48 mm이다.

Abstract

In this paper, we developed the MMIC low noise amplifier using 100 nm metamorphic HEMTs technology in combination with coplanar circuit topology for 94 GHz applications. The 100 nm × 60 μm MHEMT devices for the MMIC LNA exhibited DC characteristics with a drain current density of 655 mA/mm, an extrinsic transconductance of 720 mS/mm. The current gain cutoff frequency (f_T) and maximum oscillation frequency (f_{max}) were 195 GHz and 305 GHz, respectively. The realized MMIC LNA represented S_{21} gain of 14.8 dB and noise figure of 4.6 dB at 94 GHz with an over-all chip size of 1.8 mm × 1.48 mm.

Keywords : metamorphic HEMT, MMIC, low noise amplifier, 94 GHz, 100 nm

I. 서 론

최근 상용화되어 있는 마이크로파 대역의 주파수 자원

고갈과 새로운 통신 시장의 급격한 발전으로 가용 주파수 대역의 불가피한 확장이 요구되고 있다. 이에 따라 넓은 주파수 대역폭을 제공할 수 있으며 주파수 재사용율이 높은 밀리미터파 대역을 기반으로 하는 기술이 주목받고 있으며, 그에 따른 제반 기술 개발의 필요성이 증가되고 있다. 밀리미터파 대역 중 V-band (50 GHz~75 GHz)인 60 GHz 대역은 산소분자의 강한 신호 흡수 특성 때문에 가정 및 사무용 무선 LAN에 응용되고 있으며 W-band (75 GHz~110 GHz) 대역은 신호 흡수 감쇠가 적어 77 GHz 자동차 충돌방지 시스템, 94 GHz FMCW (frequency modulation continuous wave) 레이더 시스템과 radiometer 시스템 등의 응용을 위한 연구가 활발하

* 평생회원, 국립한밭대학교 전자공학과
(Dept. of EE, Hanbat National University)

** 정회원, 국방기술품질원
(Defense Agency for Technology and Quality)

*** 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(Millimeter-wave INnovation Technology research center, Dongguk University)

※ 이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의
하여 수행되었습니다.

접수일자: 2008년3월20일, 수정완료일: 2008년7월24일

게 진행되고 있다.

밀리미터파 대역에서의 다양한 시스템을 구현하기 위하여 우수한 성능을 갖는 저잡음 증폭기 (low noise amplifier)는 가장 중요한 부품 중 한가지이다. 그러나 94 GHz 대역의 경우 국내에서는 아직 소형화 및 신뢰성의 장점이 있는 MMIC (millimeter-wave monolithic integrated circuit) 저잡음 증폭기에 대한 보고가 거의 없는 실정이다. 외국의 경우에는 InP 기반의 HEMT's (high electron mobility transistors)를 이용한 결과물들이 발표되고 있다.

InP 기반의 HEMT는 GaAs 기반의 HEMT와 비교하여 높은 이득 특성과 낮은 잡음 특성 및 300 GHz 이상의 차단 주파수를 갖는 우수한 초고주파 특성 등 여러 장점 때문에 밀리미터파 대역에서 동작하는 증폭기의 응용에 주로 사용되어져 왔다^[1~3]. 그러나 GaAs 기반의 웨이퍼와 비교하면, InP 기반의 웨이퍼는 역학적으로 부서지기 쉬운 성질과 높은 재료비용과 같은 결정적인 결점을 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 GaAs 기판 위에 metamorphic 버퍼층 (buffer layer)을 사용하는 InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT (MHEMT)가 제안 되었고, 이를 이용한 모듈의 연구가 꾸준히 진행되고 있다^[4~6].

따라서 본 논문에서는 94 GHz 대역의 MMIC 저잡음 증폭기의 개발을 위하여 GaAs 기반의 MHEMT를 개발 하였으며, 회로설계를 위한 CPW 및 수동소자 라이브러리를 구축한 후 이를 이용하여 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기를 개발하였다.

II. 100 nm MHEMT 특성

그림 1에 MBE (molecular beam epitaxy)를 사용하여 (100) GaAs 기판위에 성장된 에피층의 구조를 나타내었다. 에피층과 GaAs 기판 사이의 매우 큰 격자 부정합 (lattice mismatch)을 완화시키기 위하여 InAlAs를 사용하며 In 몰분율이 0.01부터 0.5까지 변화하는 inverse step graded metamorphic 버퍼층을 적용하였으며 채널층에서의 In 몰분율은 0.53 이다.

n+ InGaAs cap 층을 제거하고 난 후의 Hall 측정으로부터 상온 (300 K)에서의 2-DEG층의 면 전하밀도는 $3.36 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이고 전자의 이동도 (mobility)는 9070 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이었다.

그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작

In_{0.53}Ga_{0.47}As	Capping layer	15 nm
In_{0.52}Al_{0.48}As	Schottky layer	10 nm
Si planar doping $4.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$		
In_{0.52}Al_{0.48}As	Spacer layer	3 nm
In_{0.53}Ga_{0.47}As	Channel layer	15 nm
In_{0.52}Al_{0.48}As	Spacer layer	4 nm
Si planar doping $1.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$		
In_{0.52}Al_{0.48}As	Buffer layer	400 nm
In_xAl_{1-x}As (x=0~0.5)	Grade Buffer layer	1000 nm
Semi-insulating GaAs substrate		

그림 1. InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT의 예피 구조 단면도

Fig. 1. Epi. structure of InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT.

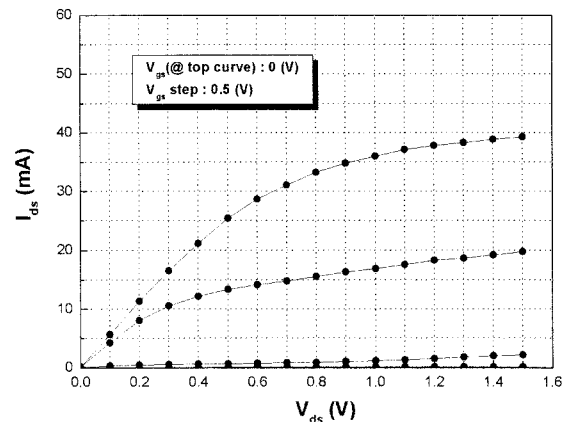


그림 2. 제작된 100nm x 60um MHEMT의 I-V 특성
Fig. 2. I-V characteristics of the fabricated 100nm x 60um MHEMT.

하였으며 소자 제작을 위하여 적용된 단위 공정으로는 소자의 전기적 격리를 위한 메사 (mesa) 식각 공정, AuGe/Ni/Au계의 금속층을 이용한 오믹 (ohmic) 공정, 전자빔 노광 시스템을 사용하는 100 nm T-게이트 (T-gate) 공정, 격리된 소스 전극을 서로 연결하기 위한 에어브리지 (air-bridge) 공정, 노출된 소자 채널을 보호하기 위한 Si₃N₄ 적층 (passivation) 공정 순으로 진행 되었다^[7~8]. 상기 방법으로 제작된 MHEMT의 게이트와 소스 간의 간격은 0.97um이고 드레인 (drain)과 소스 (source)의 간격은 2um이다.

제작된 MHEMT의 전압-전류 및 전달 컨덕턴스 특성을 HP사의 4156A semiconductor parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 제작된 MHEMT의 DC 특성 측정 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

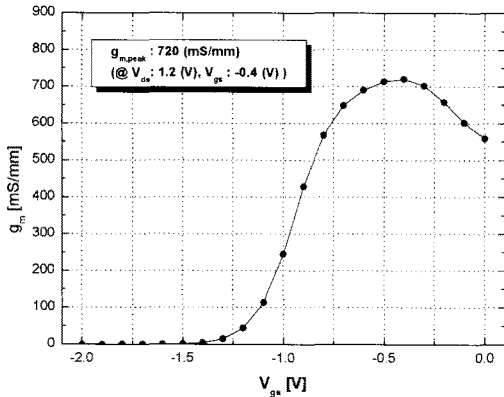


그림 3. 100 nm × 60 μm MHEMT의 전달컨덕턴스 특성
 Fig. 3. Transconductance characteristics of the fabricated 100 nm × 60 μm MHEMT.

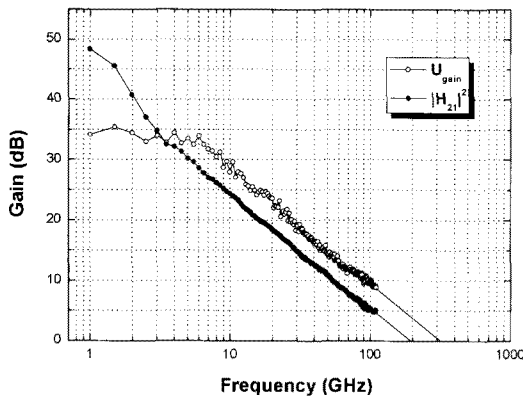


그림 4. 제작된 100 nm × 60 μm MHEMT의 주파수 함수로서의 Ugain 이득과 |h₂₁|² 특성
 Fig. 4. Current gain ($|h_{21}|^2$) and Mason's unilateral gain (U_{gain}) characteristics as a function of frequency for the fabricated 100 nm × 60 μm MHEMT.

단위 게이트 폭 (unit gate width)이 30 μm이고 게이트 핑거 (gate finger) 수가 2개인 소자의 핀치 오프 (pinch-off) 전압은 -1.0 V, 드레인 전류밀도 (drain current density)는 $V_{gs} = 0$ V에서 655 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스 (transconductance)는 $V_{ds} = 1.2$ V 및 $V_{gs} = -0.4$ V에서 720 mS/mm를 얻었다.

제작된 MHEMT의 S-parameters 특성은 Anritsu ME7808 VNA (vector network analyzer)를 사용하여 500 MHz~110 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 측정에 사용된 바이어스 조건은 $V_{ds}=1.2$ V, $V_{gs}=-0.4$ V이다. 측정 결과, 195 GHz의 전류이득차단주파수 (f_T)와 305 GHz의 최대공진주파수 (f_{max})를 얻었다. 그림 4에 제작된 100 nm × 60 μm MHEMT의 RF 특성을 나타내었다.

III. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기

MMIC 저잡음 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작 특성을 표현하는 소자 모델의 개발이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 제작된 100nm × 60μm MHEMT의 대신호 모델을 추출하였다. 대신호 모델의 추출결과를 500 MHz에서 110 GHz 영역에서 비교한 결과, 모델값과 측정값이 잘 일치하였다. 그림 5에 MHEMT의 대신호 추출결과를 나타내었다.

MMIC 저잡음 증폭기는 100 nm MHEMT 소자, MIM (metal-insulator-metal) 커패시터 (capacitor)와 Ti 박막 저항 (Ti-thin-film-resistor) 등의 수동소자 및 CPW 라이브러리를 사용하여 설계 하였다. CPW 전송선로는 마이크로스트립 전송선로에 비하여 후면공정이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며,

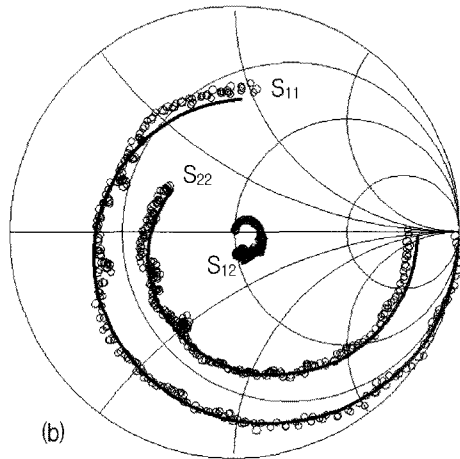
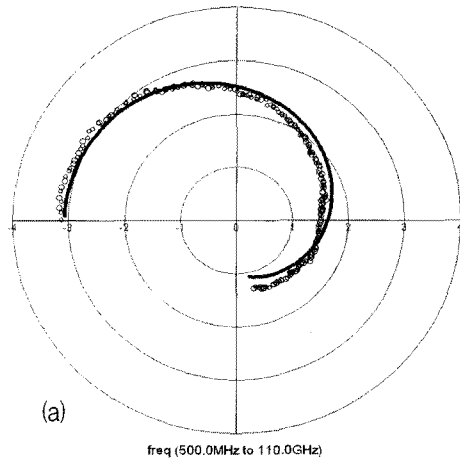


그림 5. MHEMT 대신호 모델링 결과 (a) S₂₁, (b) S₁₁, S₁₂, S₂₂ (—: 모델값, ○: 측정값)
 Fig. 5. The large signal modeling result of the MHEMT. (a) S₂₁, (b) S₁₁, S₁₂, S₂₂ (—: modeled data, ○: measured data)

다수의 회로들이 발표되고 있다. CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70 Ω의 특성임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 curve, tee, cross의 라이브러리를 구축하였다. 제작된 Ti 박막저항은 31.1~35.1 Ω/□의 면저항 (sheet resistance) 특성을 나타내었으며 MIM 커패시터는 1.17~8.89 pF의 커패시턴스 (capacitance) 특성을 나타내었다.

그림 6에 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 회로도를 나타내었다. 저잡음 증폭기의 전체 회로는 2단으로 구성하였으며 CPW 전송선로를 사용하여 정합회로를 구성하였다. 입력 정합회로는 낮은 잡음 특성을 위해 잡음 정합을 하였으며, 출력 정합회로는 높은 이득 특성을 위해 공액 정합하였다. 입력 정합회로에서는 잡음 특성을 좀 더 정확하게 시뮬레이션하기 위하여, 대신호 모델을 기반으로 하는 최적화된 잡음 모델을 사용하였다. 잡음 모델은 저잡음 증폭기의 중심주파수인 94 GHz에서 제작된 100nm × 60μm MHEMT 소자의 Γ_{opt} 값을 구하고, 이를 대신호 모델의 Γ_{opt} 와 비교하여 두 값의 차이가 최소화 되도록 대신호 모델을 최적화하였다. 바이어스 회로는 $\lambda/4$ short stub를 사용하여 94 GHz 대역 고주파 신호가 바이어스 라인으로의 손실을 방지하도록 설계하였으며 저항을 추가하여 안정도를 향상시켰다. 설계된 전체 회로 패턴은 Agilent-momentum 시뮬레이션을 통하여 최적화를 수행하였다.

94 GHz 저잡음 증폭기를 제작하기 위하여 CPW 전송선로와 Si₃N₄ 유전체를 사용하는 MIM 커패시터, Ti 박막 저항, 에어브리지, 100 nm MHEMT를 칩 내부에 일괄적으로 형성하였다^[7-8].

공정 순서는 다음과 같다. 우선 소자의 전기적 격리를 위한 메사 식각 공정을 거쳐, 오믹 접촉을 형성하고 저항을 제작한다. 전자빔 노광장비를 사용하여 100 nm 게이트

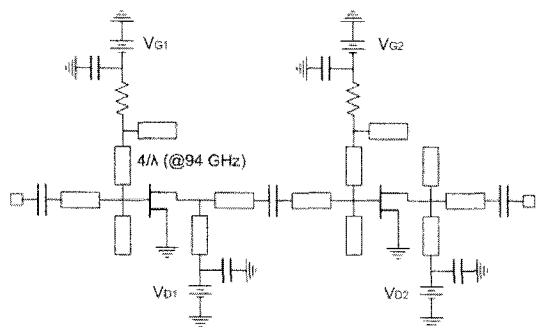


그림 6. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 회로도
Fig. 6. The circuit diagram of the 94 GHz MMIC low noise amplifier.

패턴을 형성한 후, 게이트 패턴을 이용한 narrow 게이트 리세스 공정을 거쳐 게이트 전극을 형성한다. CPW 전송선로 및 접지 (ground) 영역과 커패시터의 bottom 전극을 위한 1차 금속층을 형성한 후, 노출된 소자의 채널 보호와 동시에 커패시터의 유전층으로 사용되는 Si₃N₄층을 적층한다. 상호 격리된 전극의 연결을 위한 에어브리지와 커패시터의 top 전극을 위한 2차 금속층이 형성될 부분을 RIE (reactive ion etching) 방법으로 식각하고 2차 금속층을 형성한다. 그림 7에 제작된 94 GHz MMIC 2단 저잡음 증폭기의 표면 사진을 나타내었으며 전체 칩 크기는 1.8 mm × 1.48 mm 이다.

제작된 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 S-parameters 특성은 Anritsu ME7808 VNA와 Cascade사의 on-wafer probing 시스템을 사용하여 1 GHz~110 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 저잡음 증폭기의 측정결과 94 GHz

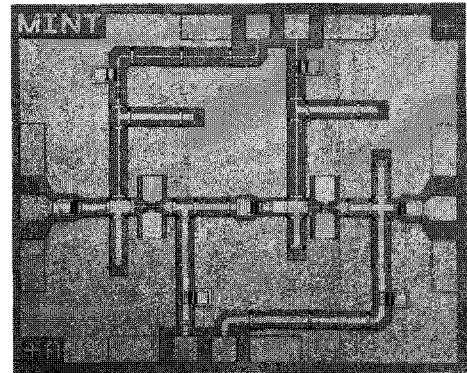


그림 7. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 표면사진
Fig. 7. The chip photograph of the 94 GHz MMIC low noise amplifier.

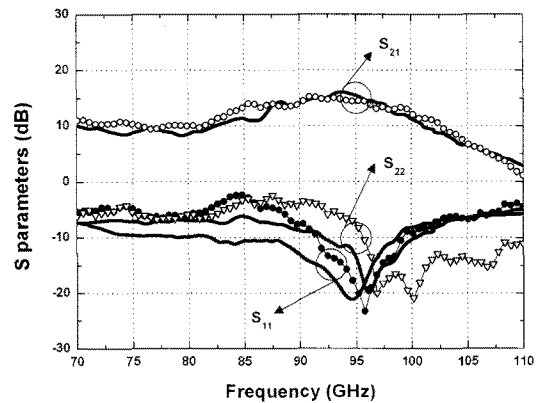


그림 8. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 S-parameters 측정결과 (-: 시뮬레이션, ○,●,▽: 측정결과)
Fig. 8. The S-parameters measured results of the 94 GHz MMIC low noise amplifier.(-: simulated results, ○,●,▽: measured results)

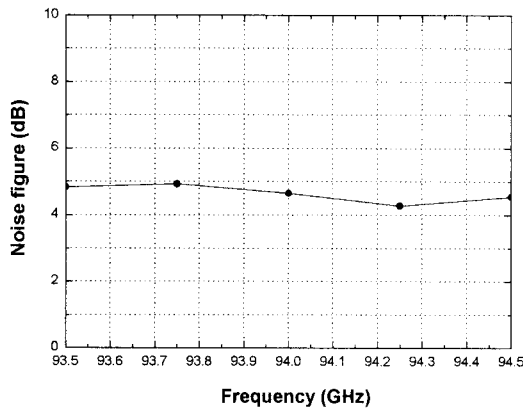


그림 9. 94 GHz MMIC 저잡음 증폭기의 잡음 특성
Fig. 9. The noise characteristics of the 94 GHz MMIC low noise amplifier.

에서 14.6 dB의 우수한 S_{21} 이득 특성을 얻었으며 -15.8 dB의 입력반사계수 (S_{11})와 -6.7 dB의 출력반사계수 (S_{22})를 얻었다. 그림 8에 제작된 증폭기의 S-parameters 시뮬레이션 및 측정결과를 나타내었다.

그림 9에 HP 8970B noise figure meter와 MT993B noise parameter test set을 사용하여 93.5 GHz~94.5 GHz의 범위에서 측정된 잡음지수 특성을 나타내었다. $V_{ds}=0.8$ V, $V_{gs}=-0.7$ V 일 때 94 GHz에서 4.6 dB의 우수한 잡음 특성을 얻었으며 94.25 GHz에서 4.28 dB의 최소 잡음지수를 얻었다. 측정된 잡음지수는 93.5 GHz ~ 94.5 GHz의 측정 대역에서 5 dB 이하의 양호한 특성을 보였다.

본 논문에서 연구된 저잡음 증폭기는 94 GHz 대역에서 국내에 최초로 보고되는 MMIC 저잡음 증폭기로 양호한 잡음지수 특성과 이득특성을 나타내어 94 GHz FMCW 레이더 시스템과 이미징 시스템 등의 밀리미터파 시스템 응용에 충분히 적용 가능할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 94 GHz 대역 시스템의 응용을 위하여 100 nm InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT와 CPW 기술을 이용하여 우수한 성능의 MMIC 저잡음 증폭기를 구현하였다.

제작된 100 nm × 60 μm MHEMT는 655 mA/mm의 드레인 전류밀도, 720 mS/mm의 전달컨덕턴스 특성, 195 GHz와 305 GHz의 전류이득차단주파수와 최대공진 주파수 특성을 나타내었다.

94 GHz MMIC 저잡음 증폭기는 제작된 MHEMT, CPW 전송선로, 수동소자 라이브러리를 이용하여 설계

하였다. 제작된 MMIC 저잡음 증폭기의 측정결과, 94 GHz에서 14.6 dB의 S_{21} 이득 특성과 -15.8 dB의 입력반사계수 및 -6.7 dB의 출력반사계수를 얻었다. 94 GHz에서의 잡음지수는 4.6 dB의 우수한 특성을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] P. H. Liu, et al., "High Gain G-band MMIC Amplifiers based on Sub-50nm Gate Length InP HEMT," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 22-23, 2007.
- [2] A. Tessmann, "220-GHz Metamorphic HEMT Amplifier MMICs for High Resolution Imaging Applications," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 40, no. 10, pp. 2070-2076, 2005.
- [3] K. Elgaid, et al., "Low Noise W-band MMIC Amplifier Using 50 nm InP Technology for Millimeterwave Receivers Applications," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 523-525, 2005.
- [4] P. M. Smith, et al., "Progress in GaAs Metamorphic HEMT Technology For Microwave Applications," in *Proc. IEEE GaAs IC Symp.*, pp. 21-24, 2003.
- [5] C. S. Whelan, et al., "GaAs Metamorphic HEMT (MHEMT): An Attractive Alternative To InP HEMTs For High Performance Low Noise And Power Applications," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 337-340, 2000.
- [6] S. C. Kim, et al., "High-Performance 94-GHz Single Balanced Mixer Using 70-nm MHEMTs and Surface Micromachined Technology," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 28-30, 2006.
- [7] S. C. Kim, et al., "50 nm InGaAs/InAlAs/ GaAs Metamorphic High Electron Mobility Transistors Using Double Exposure at 50 kV Electron-beam Lithography Without Dielectric Support," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 22, no. 4, pp. 1807-1810, 2004.
- [8] S. C. Kim, et al., "High Conversion Gain Cascode Quadruple Subharmonic Mixer For Millimeter-wave Applications," *Current Applied Physics*, vol. 5, no. 3, pp. 231-236, 2005.

저 자 소 개



김 성 찬(평생회원)
 1999년 동국대학교 전자공학과
 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과
 공학석사
 2006년 동국대학교 전자공학과
 공학박사

2006년~2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 박사후연구원

2007년~현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제
 작>



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

2006년~2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 박사후연구원

2007년~현재 국방기술품질원 선임연구원
 <주관심분야 : 밀리미터파 회로 설계>



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

1985년 Cray Research, USA, Research
 Scientist

1985년 Microwave Semiconductors, USA,
 Senior Engineer

1990년~1991년 University of Michigan,
 Visiting Research Scientist

1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수

1995년~현재 한국 전자파학회 이사

1999년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 소장

2004년 대한전자공학회 수석부회장

2005년 대한전자공학회 회장

<주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제
 작>