

논문 2011-48TC-11-13

# Tuner System을 이용한 밀리미터파 탐색기용 W-band MMIC 저잡음 증폭기

( W-band MMIC Low Noise Amplifier for Millimeter-wave Seeker  
using Tuner System )

안 단\*, 김 성 찬\*\*, 이 진 구\*\*\*

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

## 요 약

본 논문에서는 밀리미터파 Tuner system을 이용하여 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 W-band MMIC 저잡음 증폭기를 구현하였다. 저잡음 증폭기를 위해 구현된 MHEMT의 측정결과 692mA/mm의 드레인 전류 밀도, 726mS/mm의 최대전달컨덕턴스를 얻었으며, RF 특성으로 전류이득차단주파수는 195GHz, 최대공진주파수는 305GHz의 양호한 성능을 나타내었다. 제작된 W-band 저잡음 증폭기의 측정결과 94GHz에서 7.42dB의 우수한 S21 이득 특성을 얻었으며, 잡음 지수의 측정결과 94.2GHz에서 2.8dB의 잡음 특성을 얻었다.

## Abstract

In this paper, we developed the W-band MMIC low noise amplifier for the millimeter-wave seeker using the tuner system. The MHEMT devices for MMIC LNA exhibited DC characteristics with a drain current density of 692mA/mm, an extrinsic transconductance of 726mS/mm. The current gain cutoff frequency( $f_T$ ) and maximum oscillation frequency( $f_{max}$ ) were 195GHz and 305GHz, respectively. The fabricated W-band low noise amplifier represented S21 gain of 7.42dB at 94 GHz and noise figure of 2.8dB at 94.2 GHz.

**Keywords :** Low noise amplifier, Tuner system, MHEMT, MMIC, W-band

## I. 서 론

군사과학 기술의 발전으로 최근의 전쟁양상은 이전에 보여주었던 물량위주의 대량 화력 집중의 전쟁양상과는 판이하게 다른 정밀 타격의 양상으로 진행되고 있다. 따라서 정밀 유도무기를 사용하여 목표물을 정확히 타

격하는 것이 중요한 전장 운영개념이 되고 있다.

이러한 측면에서 정밀 유도무기의 핵심적인 부분은 표적을 탐색/추적하는 탐색기이며, 탐색기 종류에 따라 적외선/광학탐색기, 레이더 탐색기로 분류할 수 있다. 이중 레이더 탐색기의 경우 최근 밀리미터파 탐색기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

밀리미터파 탐색기는 마이크로파 탐색기에 비하여 탐지거리는 짧지만 우수한 분해능 특성을 갖고 있으며, 작은 안테나 사이즈로도 샤프한 빔을 형성시킬 수 있다. 이러한 장점으로 정밀한 타격이 요구되는 대탄도탄용 지대공 유도무기 및 대전차 유도무기에 적용되고 있으며, 작은 크기로 제작이 가능하기 때문에 소형 유도폭탄의 종말단계 탐색기나 지능탄 센서로도 연구되고

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

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

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

접수일자: 2011년3월10일, 수정완료일: 2011년11월14일

있다. 대표적인 적용 예로 헬파이어 대전차 유도탄 및 PAC-3 유도탄은 Ka-band 대역의 밀리미터파 탐색기를 적용하였으며, 최근 개발된 영국의 Brimstone 대전차 유도무기의 경우 94GHz 밀리미터파 탐색기를 장착하고 있다.

밀리미터파 탐색기는 주로 대기중의 흡수감쇄가 적은 35GHz나 94GHz의 주파수를 이용하고 있으며, 작은 크기에 장착되어야 하기 때문에 소형이면서도 우수한 성능과 높은 신뢰성을 가져야 한다. 따라서 밀리미터파 탐색기의 경우 부품의 소형화, 신뢰성, 저가격화의 장점이 있는 MMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit)로 개발하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 현재 개발 초기 단계로 국외에서도 일부 무기체계에만 적용되고 있는 W-band 대역의 밀리미터파 탐색기에 적용할 수 있는 MMIC 저잡음 증폭기(LNA : Low Noise Amplifier)를 설계 및 제작하였다.

저잡음 증폭기는 자체 개발된 능동소자 및 수동소자를 이용하여 설계 및 제작하였으며, 최적의 잡음 특성을 얻도록 위해 Tuner system을 사용하여 설계하였다.

## II. Metamorphic HEMT의 특성

MMIC LNA에 사용된 능동소자로 Metamorphic High Electron Mobility Transistor (MHEMT)를 설계 및 제작하였다. MHEMT의 경우 기존의 W-band 대역에서 우수한 성능을 나타내는 InP HEMT의 비해 상대적으로 가격이 저렴하며, 3인치 이상의 GaAs 기판에서

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

그림 1. Metamorphic HEMT의 에피 구조 단면도  
Fig. 1. Epi-structure of Metamorphic HEMT.

성장이 가능하면서도 InP HEMT와 대등한 성능을 갖는 결과들이 발표되고 있다<sup>1~2)</sup>.

그림 1은 MBE(Molecular Beam Epitaxy)를 사용하여 GaAs 기판위에 성장된 에피층 구조를 나타낸 것으로 에피층과 GaAs 기판 사이의 매우 큰 격자 부정합을 완화시키기 위하여 InAlAs를 사용하여 In 몰분율이 0.01부터 0.5까지 변화하는 Inverse step graded metamorphic 버퍼층을 적용하였다.

그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작하였으며, 제작된 MHEMT의 전압-전류 특성 측정 결과를 그림 2에 나타내었다. 단위 게이트 폭(unit gate width)이  $30\mu m$ 이고 게이크 핑거(gate finger) 수가 2개인 소자의 핀치 오프(pinch-off) 전압은  $-1.0V$ , 드레인

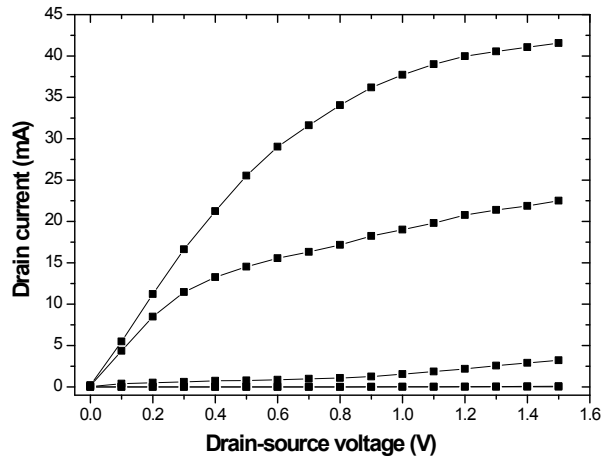


그림 2. Metamorphic HEMT의 DC 특성 측정결과  
Fig. 2. Measured DC characteristics from metamorphic HEMT.

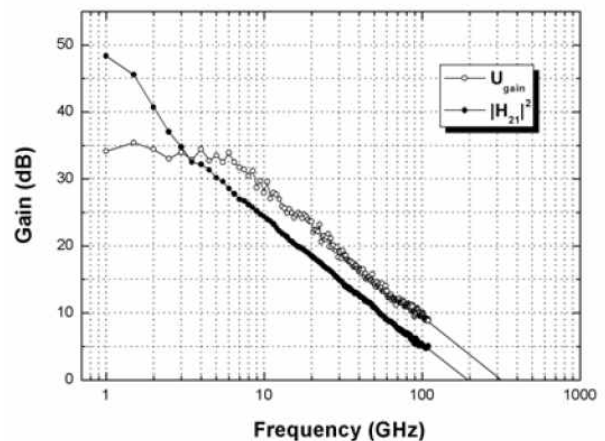


그림 3. Metamorphic HEMT의 RF 특성 측정결과  
Fig. 3. The measured result of RF characteristics from metamorphic HEMT.

전류밀도(Drain current density)는 692mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스(transconductance)는 726mS/mm를 얻었다.

MHEMT의 RF 특성은 Antitsu ME7808 VNA (Vector Network Analyzer)를 사용하여 500MHz~110GHz 주파수 영역에서 측정하였다. 측정결과, 전류이득 차단주파수( $f_T$ )는 195GHz, 최대공진주파수( $f_{max}$ )는 305GHz를 얻었다. 그림 3에 제작된 MHEMT의 RF 특성을 나타내었다.

### III. W-band 저잡음 증폭기의 설계

MMIC 저잡음 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작특성을 표현하는 소자 모델의 개발이 매우 중요하다. 그러나 94GHz와 같은 높은 주파수의 밀리미터파 대역에서는 소자의 잡음 및 대신호 모델을 추출하기가 매우 어려우며 추출된 모델도 정확도에 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 Tuner system을 이용하여 실제 소자의 최적 잡음 임피던스 점인  $\Gamma_{opt}$ 과 잡음지수 및 S-parameter를 추출하여 저잡음 증폭기를 설계하였다.

그림 4는 소자의 잡음 특성 분석을 위한 Tuner System의 블록도로 임피던스를 조절하는 Tuner와 소자는 WR-15 waveguide probe로 연결되며 측정된 밀리미터파 잡음 신호는 LNA와 Down-mixer를 통해 하향주파수 변환되어 Noise Figure meter로 연결된다.

그림 5는 Tuner System을 이용하여 추출된 잡음 특성 결과로 제작된 MHEMT는 60GHz에서 0.475∠145.4의  $\Gamma_{opt}$  값과 1.72dB의  $F_{min}$  특성을 얻었다.

MMIC 저잡음 증폭기는 추출된 MHEMT 소자의 잡

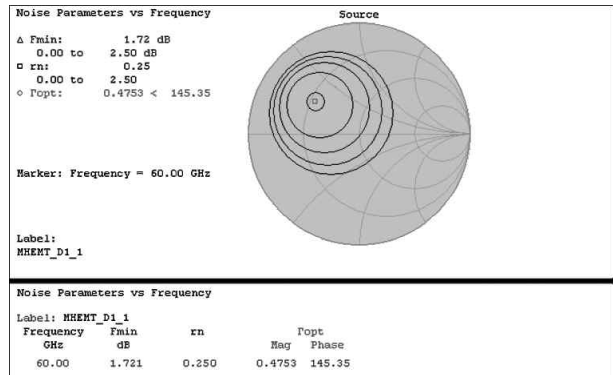


그림 5. Tuner System을 이용하여 추출된 30 $\mu$ m × 2 MHEMT 소자의 잡음 특성 분석 결과

Fig. 5. The noise analysis results of a 30 $\mu$ m × 2 metamorphic HEMT using the tuner system.

음 모델과 MIM(metal-insulator-metal) 캐패시터, Ti 박막 저항의 수동소자 및 CPW (coplanar waveguide) 라이브러리를 사용하여 설계하였다. CPW는 마이크로 스트립에 비하여 후면공정이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며, 다수의 회로들이 발표되고 있다<sup>[3~4]</sup>.

CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70  $\Omega$ 의 특성임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위해 curve, tee, cross 라이브러리를 구축하였다.

저잡음 증폭기는 1단으로 구성하였으며, CPW 전송 선로를 사용하여 정합회로를 설계하였다. 입력정합 회로는 최적화된 잡음 특성을 얻기 위하여 Tuner System을 통해 추출된  $\Gamma_{opt}$  임피던스 포인트로 정합되게 설계되었다. 출력 정합회로는 높은 이득 특성을 얻기 위해 공액 정합하였다. 바이어스 회로는  $\lambda/4$  short stub를 사용하여 고주파 신호의 손실을 방지하도록 설

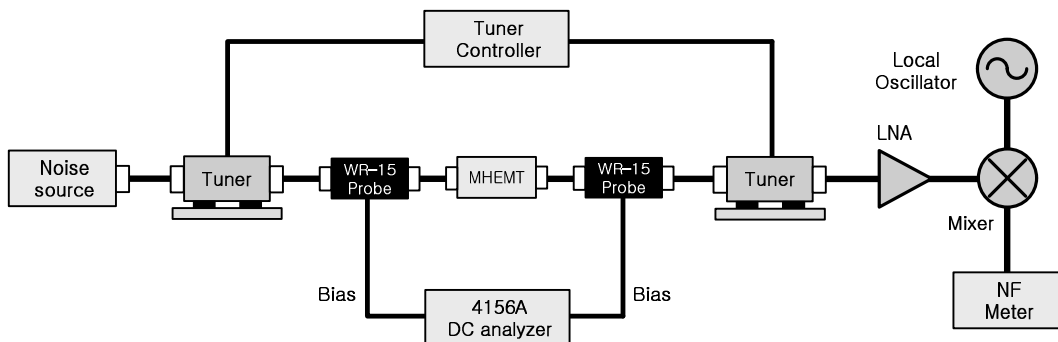


그림 4. 잡음 특성 분석을 위한 Tuner System 블록도

Fig. 4. Block diagram of the tuner system for noise characteristics analysis.

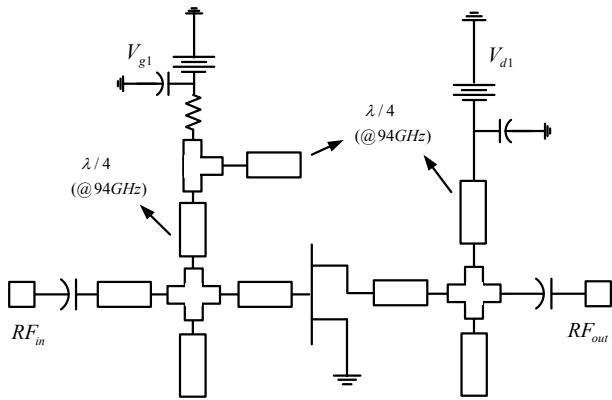


그림 6. W-band MMIC 저잡음 증폭기의 회로도  
Fig. 6. The circuit diagram of the W-band MMIC Low Noise Amplifier.

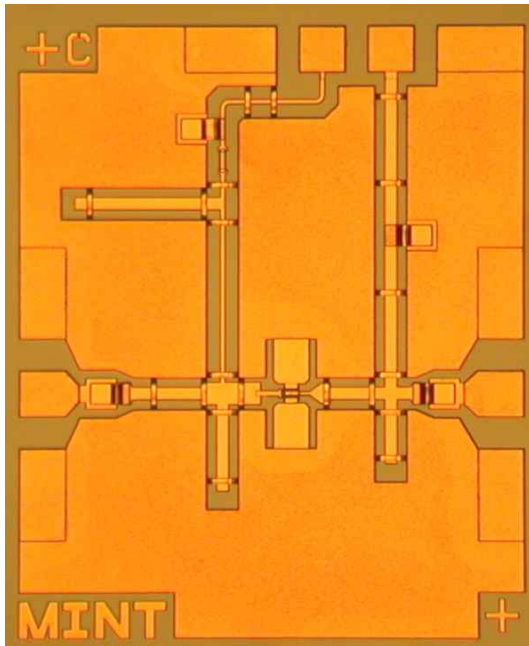


그림 7. W-band MMIC 저잡음 증폭기의 표면사진  
Fig. 7. The chip photograph of the W-band MMIC Low Noise Amplifier.

계하였으며, 저항을 삽입하여 안정도를 향상시켰다. 설계된 전체 회로 패턴은 Momentum 시뮬레이션을 통하여 최적화를 수행하였다. 그림 6에 설계된 W-band MMIC 저잡음 증폭기의 회로도를 나타내었다.

W-band MMIC 저잡음 증폭기는 제작을 위해 CPW 전송선로와 Si3N4 유전체를 사용하는 MIM 캐패시터, Ti 박막저항, 에어브리지, 100nm MHEMT를 칩 내부에 일괄 공정으로 형성하였다<sup>[5]</sup>. 그림 7에 제작된 W-band MMIC 저잡음 증폭기의 표면사진을 나타내었으며, 전체 칩 크기는 1.03mm × 1.32mm이다.

제작된 W-band MMIC 저잡음 증폭기의

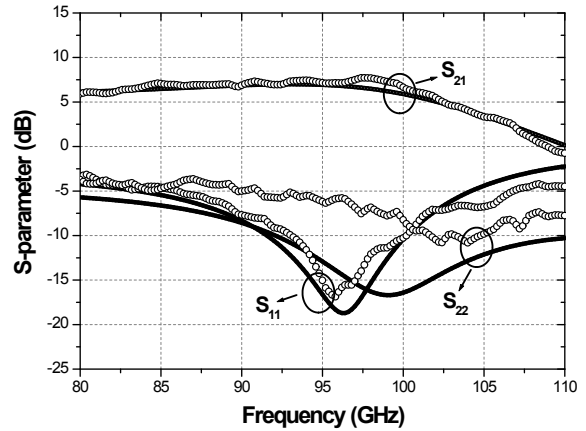


그림 8. W-band MMIC 저잡음 증폭기의 S-parameters 측정결과 (○ : 측정, — : 시뮬레이션)

Fig. 8. The S-parameters measured results of the W-band MMIC low noise amplifier(○ : measured result, — : simulation)

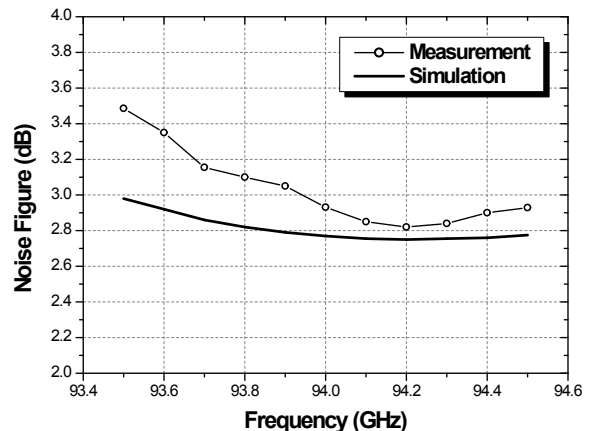


그림 9. W-band MMIC 저잡음 증폭기의 잡음지수 측정 결과 (○ : 측정, — : 시뮬레이션)

Fig. 9. The noise figure measured results of the W-band MMIC low noise amplifier(○ : measured result, — : simulation)

S-parameter 특성은 Anritsu ME7808 VNA와 Cascade사의 on-wafer probing 시스템을 사용하여 측정하였다.

저잡음 증폭기의 측정결과 94 GHz에서 7.42dB의 우수한 S21 이득 특성을 얻었으며, -11.6dB의 입력반사계수(S11) 및 -5.7dB의 출력반사계수(S22) 측정 결과를 얻었다. 그림 8에 제작된 저잡음 증폭기의 S-parameter 측정 및 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 이득과 입력 반사계수 특성은 측정과 시뮬레이션 결과가 잘 일치하였다.

W-band 저잡음 증폭기의 잡음특성은 8970B noise figure meter와 MT993B noise parameter test set을 사

용하여 93.5 ~ 94.5GHz 대역에서 측정하였다. 측정결과 드레인 전압이 0.8V, 게이트 전압이 -0.6 V 일 때 94.2GHz에서 2.8dB의 최소 잡음 특성을 얻었으며, 전 측정대역에서 3.5dB 이하의 우수한 잡음 특성을 나타내었다. 그림 9에 W-band 저잡음 증폭기의 잡음 특성 측정 결과를 나타내었다.

본 논문에서 설계 및 제작된 저잡음 증폭기는 W-band 대역에서 Tuner System을 이용해 국내에서 최초로 보고되는 저잡음 증폭기이며, 기존에 보고된 GaAs-based 저잡음 증폭기와 비교하여 우수한 잡음 특성을 나타내었다<sup>16-81</sup>. 설계 및 제작된 저잡음 증폭기는 매우 우수한 잡음 특성을 나타내어 W-band 밀리미터파 탐색기 수신단에 적용가능할 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 Tuner System과 100nm metamorphic HEMT를 이용하여 W-band 대역의 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 MMIC 저잡음 증폭기를 구현하였다. W-band MMIC 저잡음 증폭기 구현을 위하여 제작된 100nm MHEMT의 측정결과 692mA/mm의 드레인 전류밀도 726mS/mm의 최대전달컨덕턴스를 얻었으며 RF 특성으로 전류이득 차단주파수는 195GHz, 최대공진주파수는 305GHz의 양호한 성능을 나타내었다.

잡음 모델 및 대신호 모델의 한계를 극복하고 최적화된 저잡음 증폭기 설계를 위해 본 논문에서는 Tuner system을 이용하여 실제 소자의 최적 잡음 임피던스 점인  $\Gamma_{opt}$ 과 잡음지수 및 S-parameter를 추출하여 저잡음 증폭기를 설계하였다.

설계된 저잡음 증폭기는 MMIC 공정을 사용하여 제작되었으며, 저잡음 증폭기의 측정결과 94 GHz에서 7.42dB의 우수한 S21 이득 특성, -11.6 dB의 입력반사계수(S11) 및 -5.7dB의 출력반사계수(S22) 측정 결과를 얻었다. 잡음 지수의 측정결과 드레인 전압이 0.8V, 게이트 전압이 -0.6 V 일 때 94.2GHz에서 2.8dB의 최소 잡음 특성을 얻었으며, 전 측정대역에서 3.5dB 이하의 우수한 잡음 특성을 나타내었다.

본 논문에서 설계 및 제작된 저잡음 증폭기는 기존에 보고된 GaAs-based 저잡음 증폭기와 비교하여 우수한 잡음 특성을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Dan An, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, Mun-Kyo Lee, Sung-Chan Kim, Jung-Hun Oh, Sam-Dong Kim, Hyung-Moo Park, Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee, "High Switching Performance 0.1- $\mu$ m Metamorphic HEMTs for Low Conversion Loss 94 GHz Resistive Mixers," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 707-709, Oct. 2005.
- [2] Yves Baeyens, Claus Dorschky, Nils Weimann, Qinghung Lee, Rose Kopf, George Georgiou, John-Paul Matta, Robert Hamm, and Young-Kai Chen, "Compact InP-Based HBT VCOs with a Wide Tuning Range at W- and D-Band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2403-2408, Dec. 2000.
- [3] Dan An, Sung-Chan Kim, Jung-Dong Park, Mun-Kyo Lee, Hyun-Chang Park, Sam-Dong Kim, Wan-Joo Kim, and Jin-Koo Rhee, "A Novel 94-GHz MHEMT Resistive Mixer Using a Micromachined Ring Coupler" *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 16, no. 8, pp. 467-469, Aug. 2006.
- [4] Dan An, Sung Chan Kim, Woo Suk Sul, Hyo Jong Han, Han Sin Lee, Won Young Uhm, Hyung Moo Park, Sam Dong Kim, Dong Hoon Shin, and Jin Koo Rhee, "High Conversion Gain V-band Quadruple Subharmonic Mixer Using Cascode Structure," in *proceedings of IEEE International Microwave Symposium 2003*, Philadelphia, USA, pp. 911-914, June 2003.
- [5] Bok-Hyung Lee, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee, "Small-Signal Analysis of High Maximum Frequency of Oscillation 0.1- $\mu$ m Off-Set  $\Gamma$ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic High Electron Mobility Transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, pp.1914-1918, 2004.
- [6] N. Tanahashi, K. Kanaya, T. Matsuzuka, T. Katoh, Y. Notani, T. Ishida, T. Oku, T. Ishikawa, M. Komaru, and Y. Matsuda, "A W-band Ultra Low Noise Amplifier MMIC Using GaAs pHEMT," *2003 IEEE MTT-s Digest*, pp. 2225-2228, 2003.
- [7] A. Bessemoulin, J. Grunenputt, P. Fellon, A. Tessmann, and E. Kohn, "Coplanar W-band low noise amplifier MMIC using 100-nm gate length GaAs PHEMT," in *Proc. of European Microwave Conference, Amsterdam*, Oct. 2004, pp. 25-28.
- [8] Mikko Karkkainen, Mikko Varonen, Kari A. I.

Halonen, Mikko Kantanen, Timo Karttaavi, and Tanpani Narhi, "Coplanar 94GHz Metamorphic HEMT Low Noise Amplifiers," *2006 IEEE MTT-s Digest*, pp. 29-32, 2006.

저 자 소 개



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

2006년~2007년 동국대학교 연구교수  
 2007년~현재 국방기술품질원 선임연구원  
 <주관심분야: 밀리미터파 탐색기, 적외선 탐색기>



김 성 찬(평생회원)  
 1998년 동국대학교 전자공학과  
 공학사  
 2000년 동국대학교 전자공학과  
 공학석사  
 2006년 동국대학교 전자공학과  
 공학박사

2006년~2007년 동국대학교 밀리미터파신기술  
 연구센터 박사후 연구원  
 2007년~현재 한밭대학교 전자공학과 교수  
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로설계>



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  
 1991년 University of Michigan,  
 Visiting Research Scientist  
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수  
 1999년~현재 동국대학교 밀리미터파신기술  
 연구센터 소장  
 2004년 대한전자공학회 수석부회장  
 2005년 대한전자공학회 회장  
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로설계>